

**CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DE CONCRETOS DE MEDIANA Y ALTA  
RESISTENCIA DISEÑADOS CON AGREGADOS DE COLOMBIA**

DANIEL FERNANDO ALFONSO DÍAZ  
Ingeniero Civil



FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DEL NORTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA  
2020

DANIEL FERNANDO ALFONSO DIAZ  
INGENIERO CIVIL

Tesis de grado para optar por el título de Magister en Ingeniería Civil

Asesores: CARLOS ARTETA, Ph.D  
MARGARETH DUGARTE, Ph.D



FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DEL NORTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA  
2020

El comité a cargo de este trabajo de grado certifica que Daniel Fernando Alfonso Díaz aprobó los requisitos para optar al título de Máster en Ingeniería Civil

Director

Fecha

Co - Director

Fecha

Fecha

Fecha

Universidad del Norte

Abril 2020

# Contenido

---

Capitulo 1. Resumen .....	14
Capitulo 2. Introducción.....	14
Capitulo 3. Justificación .....	17
Capitulo 4. Objetivos.....	18
4.1 Objetivo general .....	18
4.2 Objetivos específicos .....	18
Capitulo 5. Revisión de la literatura.....	19
5.1 Diagrama de esfuerzo deformación .....	20
5.2 Resistencia a la compresión .....	22
4.2.1 Incidencia del Agregado .....	22
4.2.2 Tipo - procedencia – origen del agregado .....	23
4.2.3 Forma y Textura .....	23
4.2.4 Desgaste por máquina de los ángeles .....	26
4.2.5 Tamaño del agregado .....	28
5.3 Módulo de Elasticidad del Concreto.....	29
4.3.1 Incidencia del módulo de elasticidad del agregado.....	30
4.3.2 Modelos propuestos por tipo y procedencia del agregado.....	31
4.3.3 Ecuaciones en Colombia.....	32
4.3.4 Tamaño del agregado .....	33
4.3.5 Forma y superficie.....	34
4.3.6 Desgaste .....	34
5.4 VPU.....	35
4.4.1 Incidencia del Agregado .....	36
4.4.2 Forma.....	37
4.4.3 Tamaño del agregado .....	38
4.4.4 Resistencia .....	38
4.4.5 Relación A/C.....	39
5.5 Deformación al esfuerzo máximo $\epsilon_0$ .....	40
4.5.1 Superficie de contacto .....	42
4.5.2 Tamaño del agregado .....	42

5.6 Resistividad .....	43
5.6.1 Tamaño del agregado .....	43
5.6.2 Contenido y tipo de agregado .....	44
5.6.3 Propiedades mecánicas del concreto .....	44
Capítulo 6. Materiales y programa experimental.....	46
6.1 Materiales .....	46
5.1.1 Cemento .....	46
5.1.2 Agua .....	47
5.1.3 Arena .....	48
5.1.4 Agregado grueso .....	50
5.1.5 Aditivos.....	58
5.1.6 Retardante .....	58
5.1.7 Superplastificante .....	58
Capítulo 7. Programa experimental.....	59
7.1 Fase 1 Diseño de mezclas.....	61
6.1.1 Criterios de diseño .....	61
6.1.2 Ensamble granulométrico .....	62
6.1.3 Diseños de mezcla por tipo de agregado .....	66
7.2 Fase 2 Montaje de diseños .....	69
6.2.1 Preparación de los materiales.....	69
6.2.3 Producto en proceso .....	71
6.2.4 Elaboración de especímenes .....	73
6.2.5 Capinado de cilindros .....	75
6.2.6 Módulo de elasticidad.....	80
6.2.7 Ultrasonido.....	83
6.2.8 Resistividad.....	84
6.2.9 Tensión indirecta .....	85
Capítulo 8. Resultados.....	87
8.1 Producto en proceso del montaje experimental.....	87
8.2 Tipos de agregados y su influencia en las propiedades del concreto.....	91
8.3 Propiedades mecánicas del concreto.....	93
8.4 Módulo de elasticidad del concreto .....	100

8.5 Curvas de esfuerzo – deformación del concreto.....	118
8.6 VPU.....	124
8.7 Resistividad .....	137
8.8 Tracción indirecta .....	145
Capitulo 9. Conclusiones.....	148

# Lista de figuras

---

Figura 4-1. Respuesta típica del concreto a compresión uniaxial.....	20
Figura 4-2 Patologías asociadas a la dirección de la aplicación y los meso mecanismos de falla. .....	21
Figura 4-3 Clasificación visual de la forma de los agregados, mediante medidas de esfericidad y redondez. Adaptado de (Alexander & Mindess, 2010).....	24
Figura 4-4 Clasificación visual de la forma de los agregados, mediante la morfología de este. Adaptado de (Alexander & Mindess, 2010). ....	25
Figura 4-5 Influencia de la rugosidad de la superficie del agregado grueso en: a) resistencia a la compresión, b) Modulo de elasticidad. (Hong et al., 2014).....	26
Figura 4-6. Tipos diferentes del módulo de elasticidad y la manera en cómo son definidos. (Mehta & Monteiro, 2006). ....	29
Figura 4-7 Efecto del tamaño máximo del agregado TMN en el módulo de elasticidad del concreto. ....	34
Figura 4-8 Velocidad de pulso ultrasónico a edades tempranas entre para el concreto y el mortero (Lee & Lee, 2020). ....	37
Figura 4-9 Curva de esfuerzo deformación en ensayos a compresión uniaxial, ensayos realizados a cilindros de diferentes alturas.(Vonk, n.d.) .....	40
Figura 4-10 Curvas de esfuerzo deformación de bajo carga uniaxial a la compresión con diferentes condiciones de rugosidad en el agregado : a) Superficie lisa b) Superficie rugosa c) Superficie con hendiduras (Hong et al., 2014) .....	42
Figura 5-1. Análisis granulométrico de la arena (NTC 77) con los límites establecidos en (NTC174, 2018). Fuente propia. ....	48
Figura 5-2. Ubicación de las canteras evaluadas. Fuente propia .....	51
Figura 5-3. los cinco agregados usados para el montaje experimental. Fuente Propia.....	52
Figura 5-4. Análisis granulométrico grava 1 TMN 1” (NTC 77), respecto a los limites planteados en la (NTC174, 2018). Fuente propia. ....	53
Figura 5-5. Análisis granulométrico grava 3 TMN 1” (NTC 77), respecto a los limites planteados en la (NTC174, 2018). Fuente propia. ....	54
Figura 5-6. Análisis granulométrico grava 5 TMN 1” (NTC 77), respecto a los limites planteados en la (NTC174, 2018). Fuente propia. ....	55
Figura 5-7. Análisis granulométrico grava 8 TMN 3/4” (NTC 77), respecto a los limites planteados en la (NTC174, 2018). Fuente propia. ....	56
Figura 5-8. Análisis granulométrico grava 9 TMN 3/4” (NTC 77), respecto a los limites planteados en la (NTC174, 2018). Fuente propia. ....	57
Figura 6-1Ensamble granulométrico de los 5 agregados gruesos con la arena de referencia, respecto a los límites de propuestos Fuller and Thompson para 3/4” – 1”. ....	63

Figura 6-2 Ensamble granulométrico de los 5 agregados gruesos con la arena de referencia, respecto a los límites de propuestos Fuller and Thompson para $\frac{1}{2}$ ".....	65
Figura 6-3. Acopio de los materiales usados para la elaboración de las mezclas, rotulados e identificados con la fecha de recepción. Fuente propia.1.....	70
Figura 6-4 <i>Yeso tipo IV, importado por YESOS AMERICA LTDA</i> .....	75
Figura 6-5. Pesaje de yeso y agua para la mezcla usada para el capinado. ....	76
Figura 6-6. Mezclado del yeso siguiendo la recomendación de la NTC 490.....	77
Figura 6-7. Elaboración de cubos de 50 mm para ensayo de resistencia al mortero de yeso de alta resistencia. ....	77
Figura 6-8 Cubos de yeso con distintas cantidades de agua.....	78
Figura 6-9. Ensayo a compresión de los cubos de 50 mm con yeso de alta resistencia.....	79
Figura 6-10. Resultado de resistencia a 2 horas del mortero con mejor desempeño. ....	79
Figura 6-11. Equipo para la adquisición de datos DataLog8"Controls". ....	81
Figura 6-12. Transductores de desplazamiento Controls con sensibilidad de $0.02\mu\text{m}$ , alimentación hasta 10V, recorridode $\pm 1.5\text{mm}$ . Elaboración propia .....	81
Figura 6-13. Ensamble experimental de cada cilindro, con sus tres transductores de deformación, presión y adquisición de datos.....	82
Figura 6-14 Equipo usado para el ensayo de VPU. ....	84
Figura 6-15 Ensayo de resistividad eléctrica de dos puntos.....	85
Figura 6-16 Equipo usado para el ensayo de tensión indirecta. ....	86
Figura 7-1 Producto en proceso de concreto, para los diseños convencionales de las distintas fuentes agregado por relación a/c.....	88
Figura 7-2 Producto en proceso de concreto, para los diseños de alta resistencia de las distintas fuentes agregado con relación a/c = 0.35. ....	89
Figura 7-3 Producto en proceso de concreto, para los diseños especiales realizados con el agregado #7 con a/c = 0.55.....	90
Figura 7-4 Porcentaje por tipo de partículas de cada agregado. ....	91
Figura 7-5 frecuencia de los porcentajes del tipo de origen de los agregados, respecto a la resistencia a la compresión obtenida.....	92
Figura 7-6 Influencia de la superficie del agregado en la resistencia a la compresión. ....	93
Figura 7-7. Resistencia a la compresión por tipo de agregado a 28 días, para los diseños convencionales con relaciones agua/cemento: 0.6 – 0.55 – 0.49.....	94
Figura 7-8. Resistencia a la compresión por tipo de agregado, de los diseños convencionales con relación agua/cemento: 0.60, en las edades evaluadas .....	95
Figura 7-9. Resistencia a la compresión por tipo de agregado, de los diseños convencionales con relación agua/cemento: 0.55, en las edades evaluadas .....	95
Figura 7-10. Resistencia a la compresión por tipo de agregado, de los diseños convencionales con relación agua/cemento: 0.49, en las edades evaluadas .....	96
Figura 7-11 Resistencia a la compresión por tipo de agregado, para los diseños de alta con relación agua/cemento: 0.35, en las edades evaluadas.....	96
Figura 7-12 Resistencia a la compresión por tipo de agregado, para los diseños especiales con relación agua/cemento: 0.55, en las edades evaluadas.....	97



Figura 7-13 costos normalizados de materias primas para la producción de concretos por resistencias, realizado con materiales provenientes de diferentes canteras respecto al costo de producción con la cantera local, evaluado para tres relaciones a/c.....	98
Figura 7-14 Módulos de elasticidad $E_c$ para todas las resistencias a la compresión $f'_c$ obtenidas por grupo y tipo de diseño, a distintos tamaños de agregado, edades y relaciones a/c.....	100
Figura 7-15. Espectro de resultados de módulo de elasticidad respecto a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión a las distintas edades, agregados y criterios de diseño de esta investigación. ....	101
Figura 7-16 Regresión lineal con intercepto en 0 para los diseños realizados con los agregados para concretos convencionales, en las distintas relaciones agua/cemento a diferentes edades ensayadas. ....	102
Figura 7-17 Regresión lineal con intercepto en 0 para los diseños realizados con los agregados usados para los concretos de alta resistencia, en las distintas relaciones agua/cemento a las diferentes edades ensayadas. ....	104
Figura 7-18 Regresión lineal con intercepto en 0 para los diseños realizados con los agregados usados para los concretos especiales, en las distintas relaciones agua/cemento a las diferentes edades ensayadas.....	105
Figura 7-19 Coeficiente $\alpha$ , para la ecuación de módulo de elasticidad por agregado, en las distintas relaciones agua/cemento y edades de ensayo. ....	107
Figura 7-20 Coeficiente $\alpha$ , para la ecuación de módulo de elasticidad por grupo de diseños, en las distintas relaciones agua/cemento y edades de ensayo. ....	107
Figura 7-21 Residuos del módulo elasticidad respecto a los distintos modelos presentados; el modelo de cada agregado, el modelo para todos los agregados, los convencionales y el modelo para los diseños de alta. ....	109
Figura 7-22. Coeficiente $\alpha$ promedio y con una confiabilidad del 95%, para la ecuación de módulo de elasticidad para cada agregado y diseños especiales. ....	110
Figura 7-23. Módulos de elasticidad por origen del material y la identificación del agregado. ....	111
Figura 7-24 Comparación entre los modelos propuestos por grupo de agregados con los códigos internacionales. ....	112
Figura 7-25 Comparación entre los modelos propuestos por grupo de agregados con los estudios previos realizados en Colombia. ....	113
Figura 7-26. Influencia de la densidad en el módulo de elasticidad del concreto. ....	114
Figura 7-27. Influencia del desgaste del agregado en el módulo de elasticidad del concreto. ....	115
Figura 7-28 Relación de costos de materia prima de concreto con 4 relaciones agua/cemento, variando la cantera de origen del material en las diferentes ciudades evaluadas a lo largo del módulo de elasticidad.....	116
Figura 7-29. Curva de esfuerzo deformación para el agregado # 3 a 28 días con las tres relaciones a/c.....	118
Figura 7-30. Registro de $e_0$ para por grupo de concreto.Figura 7-31 Modelos para estimar el valor de $e_0$ por tipo de agregado en lo diseños convencionales. ....	119

Figura 7-32 Diagrama de caja para $e_0$ de los agregados usados para la elaboración de concretos de alta, convencionales y especiales. ....	121
Figura 7-33. Diagrama de caja para $e_0$ de los agregados usados para la elaboración de concretos convencionales. ....	122
Figura 7-34 Diagrama de caja para $e_0$ de los agregados usados para la elaboración de concretos especiales. ....	123
Figura 7-35. Diagrama de caja para $e_0$ de los agregados usados para la elaboración de concretos de alta. ....	123
Figura 7-36 Histograma de $\varepsilon_{c0}$ por superficie del agregado. ....	124
Figura 7-37 Relacion de la resistencia a la compresion $f'_c$ y modulo de elasticidad $E_c$ respecto a la media de las lecturas de VPU, por tipo de agregado y grupo de diseño. ....	125
Figura 7-38 Regresión lineal entre la $f'_c$ y $E_c$ con la VPU, con los distintos agregados usados en los diseños convencionales. ....	128
Figura 7-39 Regresión lineal entre la $f'_c$ y $E_c$ con la VPU, con los distintos agregados usados en los diseños de alta. ....	129
Figura 7-40 Regresión lineal entre la $f'_c$ y $E_c$ con la VPU, con los distintos agregados usados en los diseños especiales. ....	130
Figura 7-41 Regresión exponencial entre $f'_c$ y $E_c$ con la VPU, con los distintos agregados usados en los diseños de alta y convencionales. ....	132
Figura 7-42 Relación entre $f'_c$ y VPU de los resultados obtenidos respecto a los modelos planteados en la literatura. ....	134
Figura 7-43 Relación entre $E_c$ y VPU de los resultados obtenidos respecto a los modelos planteados en la literatura. ....	134
Figura 7-44 Relación de la resistencia a la compresión $f'_c$ respecto a los resultados de VPU. ....	135
Figura 7-45 Relación entre $f'_c$ y $E_c$ , respecto a la resistividad del concreto por tipo de agregado, para los concretos del grupo convencional. ....	138
Figura 7-46 Relación entre $f'_c$ y $E_c$ , respecto a la resistividad del concreto por tipo de agregado, para los concretos del grupo de alta. ....	140
Figura 7-47 Relación entre $f'_c$ y $E_c$ , respecto a la resistividad del concreto por tipo de agregado, para los concretos de grupo especiales. ....	141
Figura 7-48 Relación entre $f'_c$ y $E_c$ , respecto a la resistividad del concreto por grupos de diseño. ....	144
Figura 7-49 Relación entre $f'_c$ y $E_c$ , respecto a la resistividad del concreto por grupo de diseño. ....	144
Figura 7-50 Relación grafica entre la resistencia a la compresión y la tensión indirecta de los concretos convencionales. ....	145
Figura 7-51 Histograma de los resultados de tensión indirecta por tipo de agregado, de los concretos convencionales. ....	146
Figura 7-52 Registro fotográfico de las dos caras del cilindro luego del ensayo de tensión indirecta por tipo de agregado. ....	147

# Lista de tablas

---

Tabla 4-1 Influencia del tipo del agregado en la resistencia a la compresión, entre los 28 – 55 MPa. ....	23
Tabla 4-2 Propiedades de los agregados: desgaste, densidad, absorción, resistencia la compresión por tipo y origen del material.....	27
Tabla 4-3 Resistencia de concretos a la compresión, por tipo de agregado y desgaste por máquina de los ángeles.....	28
Tabla 4-4 Ecuaciones de módulo de elasticidad de diferentes códigos e investigaciones. ....	30
Tabla 4-5 Influencia del módulo de elasticidad por origen de agregado en el módulo de elasticidad del concreto. ....	31
Tabla 4-6 Ecuaciones de módulo de elasticidad de diferentes códigos e investigaciones, por origen y tipo de agregados.....	32
Tabla 4-7 Ecuaciones de módulo de elasticidad de investigaciones en Colombia. ....	33
Tabla 4-8 Propiedades mecánicas del concreto, asociado al tipo de agregado y su % de desgaste.....	35
Tabla 4-9 Características físicas por tipo y origen de los agregados. ....	35
Tabla 4-10 Influencia de la velocidad de pulso ultrasónico por tipo de agregado en la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia en el concreto. ....	36
Tabla 4-11 Modelos para estimar las propiedades mecánicas del concreto a partir de la lectura de VPU del concreto. ....	38
Tabla 4-12 Clasificación del concreto basado en el resultado del pulso ultrasónico (Malhotra, 1976).....	39
Tabla 4-13 Modelos para estimar la deformación al esfuerzo máximo ec.....	41
Tabla 4-14 Influencia del origen del agregado en las propiedades fisicoquímicas del concreto. ....	44
Tabla 5-1. Composición química por FRX y perdidas al fuego del cemento tipo I-II. Fuente propia.....	46
Tabla 5-2. Caracterización física del cemento tipo I-II. Fuente propia.....	47
Tabla 5-3. Análisis físico químico del agua utilizada en las mezclas de concreto .....	47
Tabla 5-4. Análisis granulométrico de la arena (NTC 77). Fuente propia.....	48
Tabla 5-5. Propiedades físicas de la arena respecto a los parámetros de control de las normas correspondientes. Fuente propia. ....	49
Tabla 5-6. Propiedades físicas de la grava 1 TMN 1”, respecto a los parámetros de control de las normas correspondientes. Fuente propia.....	53
Tabla 5-7. Propiedades físicas de la grava 3 TMN 1”, respecto a los parámetros de control de las normas correspondientes. Fuente propia.....	54
Tabla 5-8. Propiedades físicas de la grava 5 TMN 1”, respecto a los parámetros de control de las normas correspondientes. Fuente propia.....	55

Tabla 5-9. Propiedades físicas de la grava 8 TMN 3/4", respecto a los parámetros de control de las normas correspondientes. Fuente propia. ....	56
Tabla 5-10. Propiedades físicas de la grava 9 TMN 3/4", respecto a los parámetros de control de las normas correspondientes. Fuente propia. ....	57
Tabla 5-11. Información técnica aditivo superplastificante AD 95. Fuente SIKA Colombia	58
Tabla 5-12. Información técnica aditivo superplastificante Visco Flow 8400. Fuente SIKA Colombia .....	58
Tabla 6-1. Diseños por relación Agua/Cemento por fuente y tamaño de agregado. ....	60
Tabla 6-2. Numero de cilindros por cada muestra y cantidad de ensayos por parámetro.....	60
Tabla 6-3. Porcentaje que pasa por cada tamiza para los 5 agregados usados en concretos convencionales.....	62
Tabla 6-4. Ensamble granulométrico para los 5 agregados gruesos con la arena de referencia, respecto a los límites de propuestos Fuller and Thompson para $\frac{3}{4}" - 1"$ . ....	63
Tabla 6-5. Porcentaje que pasa por cada tamiza para los 5 agregados usados en concretos de alta resistencia.....	65
Tabla 6-6. Ensamble granulométrico para los 5 agregados gruesos con la arena de referencia, respecto a los límites de propuestos Fuller and Thompson para $\frac{1}{2}"$ .....	66
Tabla 6-7. Diseños de mezcla para concretos convencionales, por fuente de agregado en diferentes relaciones Agua/Cemento.....	67
Tabla 6-8. Diseños de mezcla para concretos de alta resistencia, por fuente de agregado en diferentes relaciones Agua/Cemento.....	67
Tabla 6-9. Diseños de mezcla para concretos convencionales, para el agregado N°8, con relación Agua/Cemento: 0.55 y características especiales. ....	68
Tabla 6-10. Tamaño de muestras de agregados para muestreo. Tomado de: NTC 129 .....	69
Tabla 6-11. Resultados producto en proceso concretos de resistencias convencionales .....	72
Tabla 6-12. Resultados producto en proceso concretos de alta resistencia.....	72
Tabla 6-13. Resultados producto en proceso concretos de resistencias convencionales con características especiales, agregado N°8 .....	73
Tabla 6-14. Numero de muestras tomadas por edad .....	73
Tabla 6-15. Medición de dimensiones a los cilindros tomados por día de validación.....	74
Tabla 7-1 Análisis de discordancia entre todos los agregados de los concretos convencionales, del módulo de elasticidad respecto a la raíz de la resistencia a la compresión. ....	103
Tabla 7-2 Estadísticos de las líneas de tendencia entre todos los agregados de los concretos convencionales. ....	103
Tabla 7-3 Análisis de discordancia entre todos los agregados de los concretos de alta, del módulo de elasticidad respecto a la raíz de la resistencia a la compresión. ....	104
Tabla 7-4 Líneas de tendencia entre todos los agregados de los concretos convencionales, del módulo de elasticidad respecto a la raíz de la resistencia a la compresión. ....	104
Tabla 7-5. Análisis de discordancia entre todos los agregados de los concretos especiales, del módulo de elasticidad respecto a la raíz de la resistencia a la compresión. ....	105
Tabla 7-6 Líneas de tendencia entre todos los agregados de los concretos especiales, del módulo de elasticidad respecto a la raíz de la resistencia a la compresión. ....	106

Tabla 7-7 Líneas de tendencia de los grupos de diseños, del módulo de elasticidad respecto a la raíz de la resistencia a la compresión. ....	108
Tabla 7-8 Propuesta del coeficiente $\alpha$ promedio y con una confiabilidad del 95%, para la ecuación de módulo de elasticidad por grupo de diseño. ....	109
Tabla 7-9. Agrupación de agregados por origen.....	111
Tabla 7-10. Parámetros de la regresión lineal para $e_0$ respecto al agregados en los diseños convencionales. ....	120
Tabla 7-11 Coeficientes de la regresión lineal de $f'_c$ respecto a la VPU.....	126
Tabla 7-12 Coeficientes de la regresión lineal de EC respecto a la VPU .....	130
Tabla 7-13 Coeficientes de la regresión exponencial de $f'_c$ y $E_c$ respecto a la VPU .....	133
Tabla 7-14 Valores de la regresión exponencial entre la resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) y la VPU por relación a/c .....	136
Tabla 7-15 Coeficientes de la regresión lineal de EC respecto a la resistividad del concreto. ....	141
Tabla 7-16 Coeficientes de la regresión lineal de $f'_c$ respecto a la resistividad del concreto. ....	142
Tabla 7-17 Coeficientes de la regresión lineal de $f'_c$ y EC respecto a la resistividad del concreto, basado en la relación a/c.....	143
Tabla 7-18 Coeficientes de la regresión lineal de $f'_c$ y $E_c$ respecto a la resistividad del concreto, basado en la relación a/c.....	143
Tabla 7-19 Análisis de discordancia entre todos los agregados para los concretos convencionales, de la tensión indirecta MPa respecto a la resistencia a la compresión Mpa. ....	145

# Capítulo 1. Resumen

---

Para el diseño estructural es importante conocer las propiedades constitutivas de los materiales. En el caso del concreto, es de interés caracterizar la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria, la cual rara vez es presentada en la literatura por lo complejo de su captura. Es por ello, que los modelos de análisis estructural realizados a las estructuras en Colombia toman como valores de referencia los resultados propuestos por códigos extranjeros, que no representan los materiales que se emplean en la condición local.

El reglamento colombiano NSR-10 presenta una expresión general para el cálculo del módulo de elasticidad y ecuaciones por el origen del material, que en ocasiones subestiman este valor. Esta investigación presenta los resultados experimentales de 20 mezclas de las que se elaboraron 320 cilindros distribuidos en los siguientes ensayos: resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, deformación unitaria, VPU y resistividad, asociados a las cinco fuentes de gravas de distintos orígenes mineralógicos, usadas con mayor frecuencia en las principales ciudades de Colombia (Bogotá, Medellín, Cali, Cartagena, Barranquilla y Santa Marta) ofreciendo expresiones que representan el comportamiento del concreto elaborado en Colombia. Los resultados de esta investigación presentan que la ecuación general para el cálculo del módulo de elasticidad subestima en un 17% los resultados obtenidos con los agregados locales.

# Capítulo 2. Introducción

---

El concreto es un material ampliamente usado en la construcción de edificaciones, el cual es de fácil acceso para su elaboración, de gran durabilidad y con gran potencial para lograr formas que con otros materiales de construcción serían muy costosas (Mehta & Monteiro, 2006). Por lo que, conocer a detalle sus propiedades permitirá aprovechar las ventajas de este material, tomando las mejores decisiones al momento de analizar y diseñar estructuras.

Este se define como un material compuesto por una fase agregados, una fase cementante y una interfaz entre matriz y agregado que se conoce como zona de transición interfacial (ITZ), siendo los dos últimos componentes los más débiles (Scrivener et al., 2004).

El módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión, la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), resistividad y tensión indirecta son ensayos realizados al concreto que presentan desempeños asociados a los materiales empleados para su elaboración, de manera que, las propiedades del agregado como: tipo, origen, superficie de contacto, forma, % de desgaste en máquina de los ángeles y tamaño del agregado tendrán influencia en los resultados y la manera en cómo este interactúa con los demás componentes del concreto desarrollando la ITZ, definiendo las propiedades físico-mecánicas del elemento.

Para el diseño estructural, es importante conocer las propiedades constitutivas de los materiales; una de ellas el módulo de elasticidad del concreto, que establece la relación entre el esfuerzo y la deformación presentada en la zona elástica del material, entre 0 al 40% de su carga final (Takafumi Noguchi et al., 2009). El módulo de elasticidad ( $E_c$ ), junto a la deformación unitaria del concreto ( $\epsilon_{c0}$ ), son unos de los parámetros de entrada para establecer las relaciones de compatibilidad del concreto reforzado estableciendo la capacidad máxima de la sección analizada.

El código colombiano de diseño NSR10, presenta alternativas para el cálculo del módulo de elasticidad, presentando ecuaciones en las que se cuenta con la masa unitaria del concreto y el origen del agregado. Esta condición no aplica para todos los casos, ya que, si hay una tendencia directa entre la relación de estos parámetros con el valor de  $E_c$ . De igual manera el origen del agregado no es el completamente un parámetro que define las propiedades mecánicas del concreto elaborado con este.

De igual manera la NSR10 presenta una ecuación general, para los casos cuando no se posee información de las propiedades de la mezcla, la cual está basada en resultados de investigaciones extranjeras e implementadas en sus códigos de diseño, los resultados de esta investigación presentan que la ecuación general subestima en un 17% los resultados obtenidos con los agregados locales. Se ha reportado que el módulo de elasticidad varía hasta en un 30%, según el tipo de agregado y la composición del concreto (Bentz et al., 2017), lo que respalda la importancia de conocer los componentes de la mezcla para aprovechar sus propiedades.

La efectividad de estas fórmulas es cuestionable especialmente en el caso de concretos de alta resistencia, donde se ha encontrado que depende principalmente de la tipología del agregado grueso (Aïtcin & Mehta, 1990), presentando ecuaciones con pendientes más bajas y deformaciones mayores al momento de llegar a la falla, sobre estimando el módulo de elasticidad del elemento. De manera que, es necesario definir unos rangos en los que será válido el cálculo de  $E_c$  por grupo de diseño, los de alta y convencionales.

Es importante tener mecanismos y ensayos que permitan corroborar los criterios definidos a nivel de diseño. De manera que se han establecido una serie de ensayos y parámetros de control para garantizar el correcto desempeño del concreto, desde su estado plástico (asentamiento, rendimiento volumétrico, contenido de aire, fraguado), hasta medidas indirectas de las propiedades físico mecánicas una vez endurecido (VPU y resistividad).

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se tomaron 5 fuentes de agregados usados en las ciudades principales de Colombia, los cuales se caracterizaron y se utilizaron en la elaboración de diseños de mezcla en un amplio espectro de relaciones agua/cemento, divididas en tres grupos: concretos de alta resistencia, convencionales y especiales, de los que se presentan los resultados de las propiedades físico-mecánicas medidas, elaborando relaciones con las propiedades de cada agregado y los grupos establecidos.

Dentro del grupo de diseños especiales se evaluaron diseños con la incorporación del 7% de micro sílice, una fibra de celulosa y la modificación de la superficie de contacto de uno de los agregados, cuantificando el efecto de estas modificaciones a lo largo de la investigación.

La respuesta de los ensayos en la mayoría de los casos no presentó diferencias notorias, pero si se evidencio que cada propiedad evaluada presenta un resultado diferenciador en un ensayo específico, de manera que corrobora la importancia de cada uno al momento de evaluar una condición particular, donde un solo ensayo no debe ser tomado como concluyente para caracterizar un elemento.

La mayoría de las investigaciones se limitan a presentar los resultados de las propiedades físico-mecánicas del concreto, en las que frecuentemente no se observan los asentamientos, método de toma de muestras y curado, los cuales se han demostrado que influyen en los resultados del concreto (Yildirim & Sengul, 2011). Estos parámetros son importantes y es el punto de inicio para realizar comparaciones de los resultados obtenidos, es por ello que en esta investigación se definieron unos rangos de control del concreto en estado fresco para poder realizar los ensayos.

Considerando lo anterior, a lo largo de este trabajo se describen los recientes resultados obtenidos de las propiedades físico-mecánicas de concretos de mediana y alta resistencia empleando diferentes fuentes de agregados gruesos en Colombia, medidos a través de los siguientes ensayos: El módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión, deformación al esfuerzo máximo, masa unitaria del concreto, VPU, resistividad y tensión indirecta

El capítulo 4 desarrolla la revisión de la literatura, presentado los resultados más importantes y recientes de los diferentes parámetros evaluados: curva esfuerzo deformación, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad del concreto, deformación al esfuerzo máximo, velocidad de pulso ultrasónico y resistividad del concreto. Describiendo como las diferentes propiedades de los materiales influyen en los resultados finales brindando herramientas para la definición del programa experimental y el análisis de los resultados.

El capítulo 5 desarrolla las características de los materiales utilizados en el desarrollo de los diseños de mezcla. Caracterizando cada una de las cinco fuentes usadas, que corresponden a los agregados usados en cinco de las principales ciudades de Colombia.

El capítulo 6 desarrolla el programa experimental desarrollado para la obtención y análisis de los resultados, donde se definieron parámetros de control en estado plástico y el método de ensayo para los diferentes ensayos a realizar de los tres grupos de diseños, basados en resistencia y características especiales que pudieran modificar los resultados obtenidos.

El capítulo 7 desarrolla los resultados obtenidos, analizando la influencia de los criterios de diseño establecidos, producto en proceso y relaciones entre las distintas variables con las propiedades físico mecánicas caracterizadas. Presentado ecuaciones de fácil acceso y aplicación por parte de los diseñadores estructurales y personal en obra.



## Capítulo 3. Justificación

---

Para el diseño estructural es importante conocer las propiedades constitutivas de los materiales. En el caso del concreto, es de interés conocer la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la curva de esfuerzo-deformación en compresión, la cual rara vez es descrita en la literatura por lo complejo de su captura. Es por ello, que los modelos de análisis estructural realizados a las estructuras en Colombia toman como valores de referencia los resultados propuestos por códigos extranjeros, que no representan los materiales que se emplean en la condición local.

Dentro de los estudios realizados sobre este tema en Colombia, se encuentran los resultados presentados por (Farias Moreno, 1992), (Cortés et al., 1995) y los más recientes por (Ruiz et al., 2013), los cuales proponen distintas ecuaciones para el cálculo del módulo de elasticidad, con resultados inferiores a los presentados en la NSR10. Los hallazgos de la última investigación incluyen la información disponible, de los concretos ensayados en el laboratorio de la universidad de la Javeriana, en la que mezclan distintos tipos y tamaños de agregado; junto a otras características propias de cada diseño de mezcla, tales como: relaciones arena/agregado, agua/cemento, tipos de cemento y adiciones, entre otras; las cuales, modifican las propiedades mecánicas del concreto.

En cuanto a la mezcla algunos de los factores que influyen en el resultado de la deformación al esfuerzo máximo son: la relación agua/cemento, características y contenidos de cemento, masa unitaria del concreto, tipo y contenido de agregado (Domingo et al., 1985). (Vilardell et al., 1998) realizó ensayos de esfuerzo deformación, en los que separó el comportamiento del concreto y la matriz a diferentes edades, encontrando que en el mortero posee deformaciones alrededor de 0.0025 mm/mm mientras el concreto se encuentra cercano al 0.002 mm/mm, de manera que los agregados y la manera en cómo estos interactúan con la matriz modifican y rigen el comportamiento de deformación al esfuerzo máximo.

Por tal motivo, se presenta la necesidad de caracterizar las propiedades físico-mecánicas del concreto con equipos de alta precisión y tecnología, capaces de registrar las curvas de esfuerzo deformación a lo largo de todo el ciclo de carga, hasta la falla. Para el desarrollo de esta investigación se evalúan distintas fuentes de agregados en Colombia, en las que se caracteriza a detalle el agregado, estableciendo parámetros de diseño que garanticen la repetibilidad de estos a nivel industrial. Los materiales usados provienen de distintas zonas en las que tiene participación concretos ARGOS, productor de concreto que posee más del 40% de participación de mercado (ARGOS, 2018), de manera que garantiza que gran parte de las edificaciones del país se comportaran bajo estas propiedades constitutivas del material.

La pregunta de investigación es la siguiente: Cual es valor de módulo de elasticidad y el comportamiento de la curva esfuerzo deformación de los concretos producidos en Colombia, a partir de su resistencia y las propiedades del agregado utilizado para su elaboración.

# Capítulo 4. Objetivos

---

## 4.1 Objetivo general

Determinar las propiedades físico-mecánicas de concreto hidráulico de mediana y alta resistencia empleando diferentes fuentes de agregado en Colombia.

## 4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la influencia del agregado en el módulo de elasticidad ( $E_c$ ) del concreto.
- Caracterizar la influencia del agregado en la resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) del concreto.
- Caracterizar la influencia del agregado en la deformación al esfuerzo máximo del concreto ( $\epsilon_{c0}$ ).
- Analizar la influencia de la relación A/C en el módulo elástico del concreto.
- Caracterizar la velocidad del pulso ultrasónico (VPU) por fuente de agregado.
- Caracterizar la resistividad del concreto por fuente de agregado.
- Caracterizar el resultado de tracción indirecta por fuente de agregado.
- Desarrollar modelos estadísticos con los diferentes parámetros disponibles para establecer correlaciones.

## Capítulo 5. Revisión de la literatura

---

Para el diseño estructural es importante conocer las propiedades constitutivas de los materiales; una de ellas el módulo de elasticidad del concreto, que establece la relación entre el esfuerzo y la deformación presentada en la zona elástica del material. El módulo de elasticidad ( $E_c$ ), junto a la deformación unitaria del concreto ( $\epsilon_{c0}$ ), son unos de los parámetros de entrada para establecer las relaciones de compatibilidad del concreto reforzado estableciendo la capacidad máxima de la sección analizada.

El módulo de elasticidad del concreto ( $E_c$ ) es junto con la resistencia a la compresión, una de las propiedades más importantes del concreto y es requerido en el diseño de estructuras de concreto reforzado (Vakhshouri & Nejadi, 2019). Esta propiedad denota la rigidez del material y está asociada con las deformaciones estructurales y por ende debe ser mantenida dentro de los límites para evitar deformaciones excesivas que causen grietas u otras patologías en el concreto (Noguchi T et al., 2009). El concreto se define como un material compuesto por una fase agregados, una fase cementante y una interfaz entre matriz y agregado que se conoce como zona de transición interfacial (ITZ), siendo los dos últimos componentes los más débiles (Scrivener et al., 2004). El módulo de elasticidad es función de muchos parámetros asociados a estos componentes y su determinación no es una tarea simple. Por una parte, el material no es completamente elástico, sin embargo, se ha reportado que el comportamiento es elástico cuando es sometido a cargas entre 30 y 40% de su carga final (Takafumi Noguchi et al., 2009). Ecuaciones empíricas han sido empleadas entonces por los diseñadores para estimar el módulo de elasticidad asociado a la resistencia a la compresión del concreto y son encontradas en los códigos de construcción actuales. Sin embargo, la efectividad de estas fórmulas es cuestionable especialmente en el caso de concretos de alta resistencia, donde se ha encontrado que depende principalmente de la tipología del agregado grueso (Aïtcin & Mehta, 1990), reportes de investigaciones previas reportan que el módulo elasticidad varía hasta en un 30%, según el tipo de agregado y la composición del concreto (Bentz et al., 2017).

A continuación, se mencionan cada uno de los aspectos relevantes al módulo de elasticidad del concreto y su importancia en la definición de este, así como su relación con otros parámetros como la resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico, mencionando los factores relevantes de cada propiedad del concreto en función de las propiedades del agregado que es la variable de diseño a emplear en este estudio.

## 5.1 Diagrama de esfuerzo deformación

Un diagrama de esfuerzo deformación describe el comportamiento del concreto mediante la relación entre el esfuerzo generado y deformación (ASTM, 2009). Como se muestra en la Figura 5-1 el concreto inicialmente presenta un comportamiento elástico, pero con el incremento de cargas, las micro fisuras previamente establecidas en la ITZ se propagan a lo largo del elemento generando grietas que terminan en la falla (Carol & Lã, 2001) y gobiernan la forma de la curva esfuerzo deformación. (Lorecife & Patron, 2005) presentan 4 etapas que describen el historial de cargas en la curva esfuerzo-deformacion. La primera fase (cuasi-estática) se desarrolla en la parte inicial hasta alcanzar un 30% – 40% de la capacidad máxima a compresión con esfuerzos internos como el presentado en la Figura 5-2 a y b, los cuales pueden generar micro fisuras. La segunda fase (no lineal) se desarrolla desde un 40% – 50%, hasta un 70% – 80% de la capacidad máxima a compresión presentado degradación de la ITZ como se observa en la Figura 5-2 g. La tercera fase se desarrolla entre el 70% – 80% de la capacidad máxima a compresión y como se ve en la Figura 5-2 c el coeficiente de elasticidad del agregado es mayor al de algunas partes de la matriz. Por ultimo, la cuarta parte con su capacidad a compresión máxima, es donde se produce el ablandamiento, alcanzando la ruptura por compresión. Todas estas etapas durante la evolución de la carga conducen a la anisotropía del material, con mayor presencia de fisuras en dirección de la aplicación de estas (Lorecife & Patron, 2005).

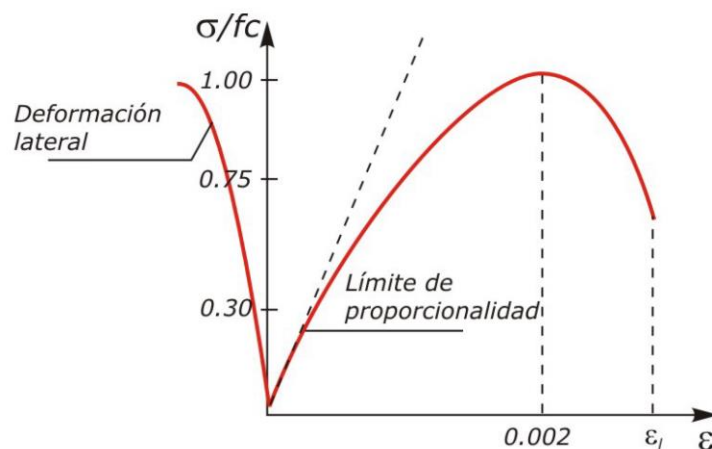
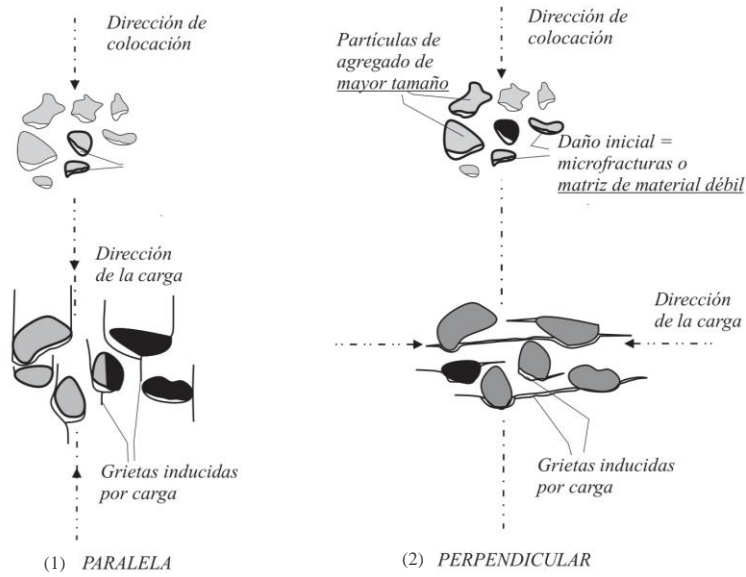


Figura 5-1. Respuesta típica del concreto a compresión uniaxial.

Los agregados gruesos se consideran generalmente la fase estable y la matriz como la fase cambiante en el tiempo (agregado fino y cementante, que sufre retracción y expansión durante el periodo de curado), dando origen a esa zona de transición ITZ, con propiedades mecánicas distintas al resto del elemento y que suelen ser más débiles. Estudios reportan que estas zonas están regidas por la dirección en la cual se realiza la colocación del concreto (Jan G.M. van Mier, 1997), generando fisuras en el mismo sentido, que al aplicarse las cargas modificaran la respuesta del elemento como se presenta en la Figura 5-2.

Patologías por la dirección de la colocación del concreto



Patologías en los meso mecanismos de falla

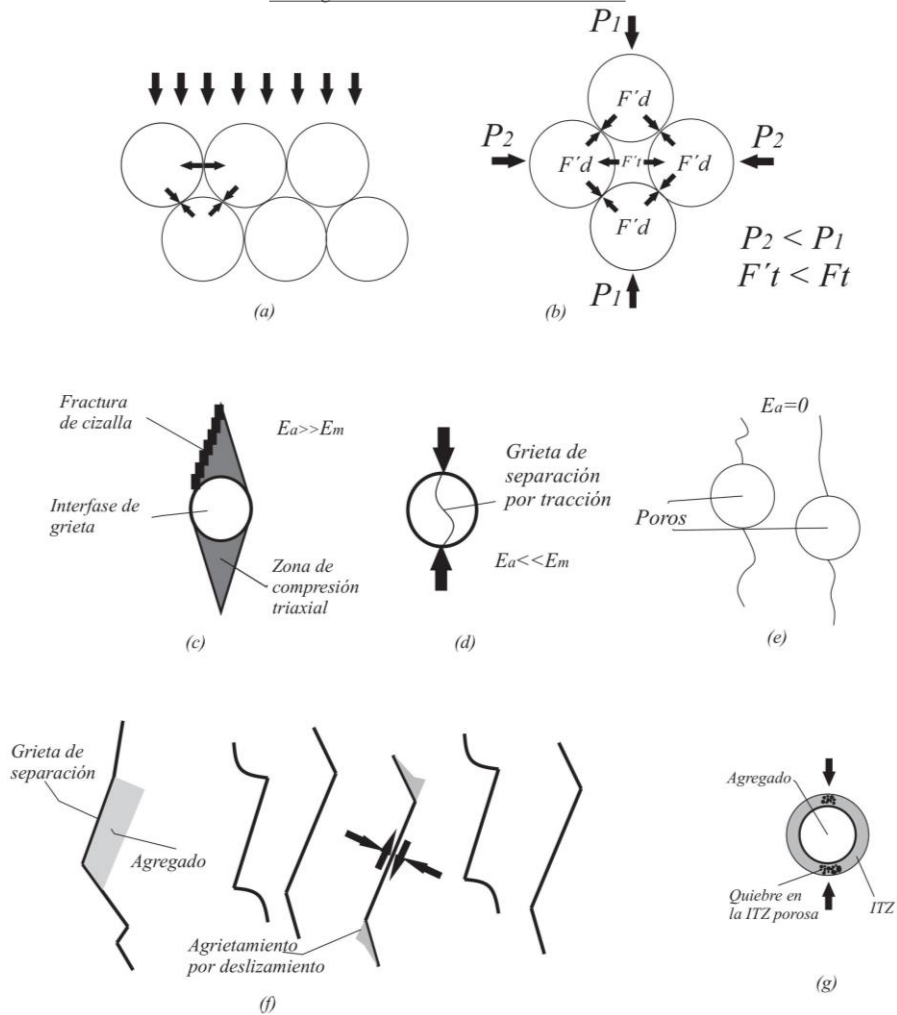


Figura 5-2 Patologías asociadas a la dirección de la aplicación y los meso mecanismos de falla.

La Figura 5-2 presenta las patologías más recurrentes en el meso mecanismo de falla del concreto, donde se representa al agregado como un conjunto de esferas del mismo tamaño que están en contacto sufriendo esfuerzos de compresión y confinamiento permitiendo la distribución de cargas en diferentes direcciones, aumentando de alguna manera la capacidad de carga Figura 5-2 a-b. las diferencias de rigidez conducen a la aparición de fracturas escalonadas y aparición de grietas por tracción, encontrando discontinuidades en los poros que no poseen rigidez, como se muestra en la Figura 5-2 c-d-e. Mientras que la separación del agregado con la matriz se puede originar por el desplazamiento en la ITZ, posiblemente por la anisotropía de esta zona que en ocasiones posee menores prestaciones que el resto del elemento.

Durante la ejecución de ensayos a compresión se evidencia como cambian las pendientes del diagrama de esfuerzo deformación, de manera que en cierto punto la tasa de resistencia disminuye respecto a la deformación en el tiempo, siendo este el momento en el que se presenta el fenómeno de ablandamiento, dando paso la generación de macro fisuras hasta llegar a su valor de carga máxima (Santiago & Hilsdorf, 1973). La aparición de fisuras no solo se da al alcanzar la carga máxima, otros factores como la condición de frontera con el equipo de ensayo influye en la aparición y el tipo de fisuras como lo reporta Van Mier en su investigación (van Mier et al., 1997), además el confinamiento con los platos retenedores tienen influencia en el valor de carga máxima adquirida y el comportamiento del ablandamiento de la curva esfuerzo deformación.

## **5.2 Resistencia a la compresión**

### **4.2.1 Incidencia del Agregado**

Las partículas de agregado componen alrededor del 75% del volumen del concreto, de manera que sus características influye en las propiedades fisicoquímicas de este (Poole & Sims, 2016). Agregados con alta densidad, tienden a tener módulos de elasticidad altos, que en la mayoría de las ocasiones y dependiendo de la resistencia del concreto son capaces de transmitirles este comportamiento (Alexander & Mindess, 2010); de igual manera agregados ligeros poseen mayor porosidad, por lo que los resultados obtenidos con estos materiales suelen ser más bajos.

Siendo la porosidad una propiedad importante que afecta el comportamiento mecánico, controlando la rigidez y la capacidad de resistir el esfuerzo axial. El comportamiento de cada agregado está relacionado a la manera en cómo este, interactúa con los demás constituyentes y cómo se desarrolla la ITZ con la matriz, por lo que, propiedades como: el tipo, el origen, superficie de contacto, forma, % de desgaste en máquina de los ángeles y tamaño del agregado tendrán influencia en la capacidad a compresión del concreto.

#### 4.2.2 Tipo - procedencia – origen del agregado

La naturaleza de los agregados se ha encontrado incide en la resistencia a la compresión del concreto. En la Tabla 5-1, se presentan los resultados de diferentes investigaciones, indicando que los concretos fabricados con cantos rodados arrojan menores resistencias a la compresión, mientras los que incluyen granito, las resistencias más altas. (Fic et al., 2018) estudió diferentes tipos de agregados naturales: granito, basalto y canto rodado, concluyendo que aun cuando los agregados de basalto y granito sufren un proceso mecánico en su manufactura, los resultados de rugosidad difieren, de manera que el granito posee mayor área de contacto con la matriz que se observa al momento de la falla, quedando mayor cantidad de pasta adherida a este tipo de agregado con respecto a los demás. Este efecto representa un incremento aproximado del 7% en comparación al basalto y un 19% respecto al canto rodado.

El agregado influye en la resistencia a la compresión debido a: su origen, proceso de manufactura, forma y textura del agregado. Donde la capacidad a compresión propia de un agregado no influye notoriamente en la resistencia a la compresión en el concreto con resistencias inferiores a 50 MPa, mientras que la manera en cómo interactúa con la matriz si es capaz de gobernar el desempeño obtenido. La resistencia a la compresión del agregado toma importancia cuando se realizan concretos de alta resistencia ( $> 50$  Mpa), ya que los planos de falla se presentan menos sobre la matriz y más por el agregado llevándolos al límite presentándose aplastamiento de estos (Wu et al., 2001), de manera que agregados de mayor resistencia permitirán alcanzar mejores resultados en concretos de alta resistencias.

Tabla 5-1 Influencia del tipo del agregado en la resistencia a la compresión, entre los 28 – 55 MPa.

Autor	A/C	Tipo de agregado	f'c	Fc relativa
(Wu et al., 2001)	0.55	Granito	43.2	100%
		Caliza	46.6	108%
		Mármol	45.0	104%
		Cuarzo	44.8	104%
		Calizo	43.0	100%
(Beshr et al., 2003)	0.35	Dolomita	44.5	103%
		Cuarzo	45.2	105%
		Escoria	55.0	128%
(Beushausen & Dittmer, 2015)	0.55	Andesita	54.3	100%
		Granito	63.7	117%
(Mohammed & Mahmood, 2016)	0.55	Agregado triturado	31.9	112%
		Canto rodado	28.4	100%
		Granito	53.0	123%
(Fic et al., 2018)	0.50	Basalto	50.2	116%
		Canto rodado	43.1	100%

#### 4.2.3 Forma y Textura

La forma y textura de las partículas no se limita a una caracterización subjetiva y discreta, sino también a medidas del agregado como, la angularidad, el alargamiento y el aplanamiento, las cuales se basan en la geometría del material, siendo su ancho, longitud y espesor las que

permiten clasificarlas (Poole, A., & Sims, 2003). Para esto se han creado las medidas de Esfericidad y redondez las cuales hacen referencia a la proximidad de la partícula a una forma esférica, como se observa en la Figura 5-3.

Esfericidad = diámetro nominal / intersección máxima

Redondez = radio promedio de esquinas y bordes / radio del círculo máximo insertado

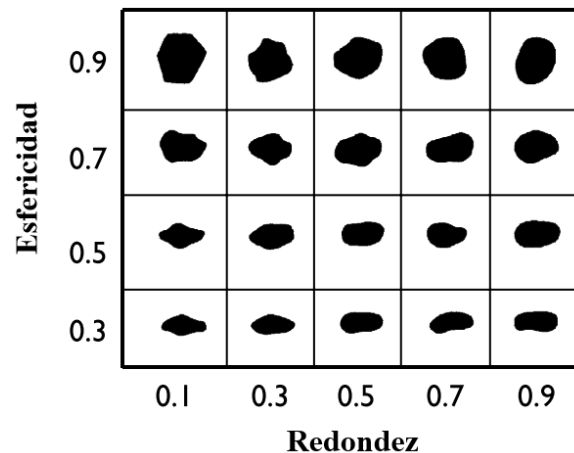


Figura 5-3 Clasificación visual de la forma de los agregados, mediante medidas de esfericidad y redondez. Adaptado de (Alexander & Mindess, 2010)

La angularidad es una medida de la falta de redondez de las partículas, donde se evalúa el contenido de vacíos del agregado, la cual se calcula de la siguiente manera.

Número de angularidad = porcentaje de vacíos – 33

Donde 33 es el contenido de vacíos de promedio de una partícula redonda, siendo este un punto de partida para clasificar los demás agregados.



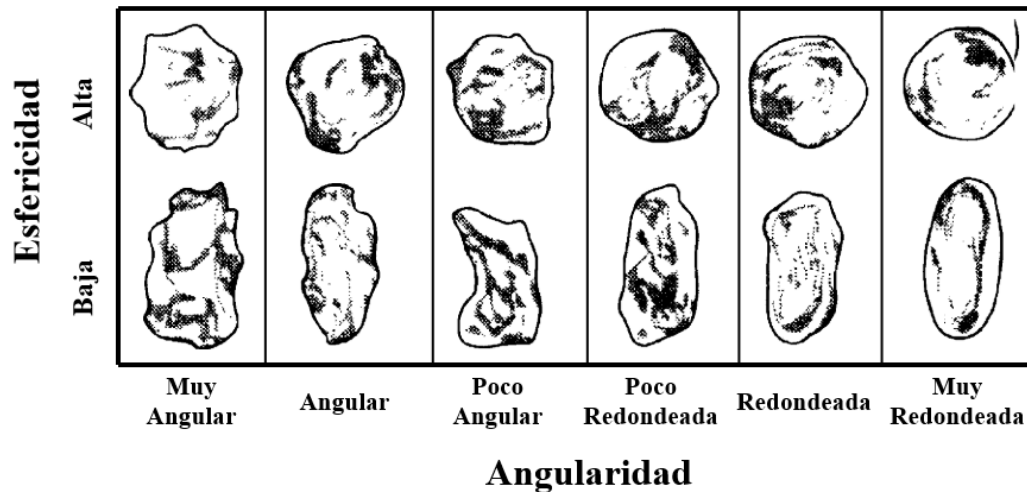


Figura 5-4 Clasificación visual de la forma de los agregados, mediante la morfología de este.  
Adaptado de (Alexander & Mindess, 2010).

De manera general estas propiedades dependen de la fuente y la naturaleza del material, como el caso de las lutitas o areniscas las cuales tienden a ser lajas de baja esfericidad con tendencias a mayores consumos de agua, mientras que los agregados triturados están muy asociados a las características del equipo empleado para su trituración, generando agregados cúbicos, sub granulares, hasta partículas planas y alargadas. Los agregados naturales tienden a ser mas redondos, esféricos y lisos por el efecto de la abrasión a la que han sido sometidos en el tiempo.

La rugosidad en la superficie del agregado puede incrementar hasta en un 10% la resistencia a la compresión, como es el caso de un agregado triturado respecto a un agregado natural (Güçlüer, 2020). En este caso mejorar la ITZ entre la pasta y el agregado aumentará el desempeño del concreto fortaleciendo la manera en cómo interactúan los agregados con la matriz, de manera que los concretos de alta resistencia tendrán mejor desempeño con agregados de superficie rugosa.

Dentro de los resultados presentados por (Hong et al., 2014) se concluye, que la fuerza de unión entre el agregado y la matriz incrementa y tiende a ser constante a medida que la rugosidad aumenta. Agregados de Basalto poseen menor adherencia en la ITZ, mientras que los de cuarzo presentan la mayor adherencia seguidos por las calizas que a rugosidades superiores a  $450\ \mu\text{m}$  se comportan similares. Aumentar la rugosidad del material mejora la cohesión, pero no el Angulo de fricción interfacial el cual llega a un punto máximo. La Figura 5-5 presenta la relación entre la rugosidad del agregado y la resistencia a la compresión, para ello se evaluaron tres agregados artificiales en los que modifiqué la superficie de contacto, reforzando la relación directa de esta propiedad con los resultados a compresión obtenidos.

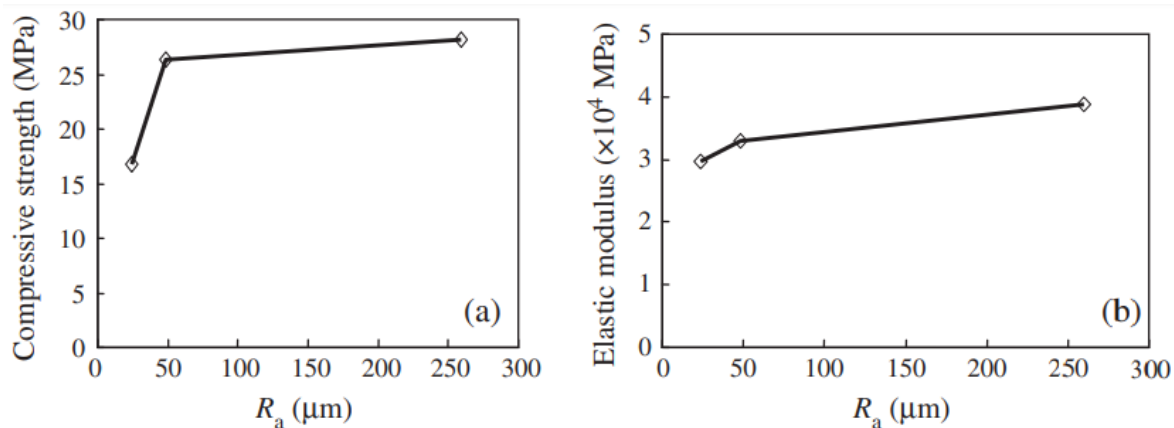


Figura 5-5 Influencia de la rugosidad de la superficie del agregado grueso en: a) resistencia a la compresión, b) Modulo de elasticidad. (Hong et al., 2014)

#### 4.2.4 Desgaste por máquina de los ángeles

Conocer y tener herramientas que sean capaces de estimar las propiedades de un material, permitirán estimar comportamientos esperados a partir de los resultados disponibles. Es por ello que caracterizar a detalle las propiedades de los agregados permitirá establecer relaciones con el concreto; el trabajo realizado por (Ugur et al., 2010) presenta los resultados de los ensayos de caracterización realizados a distintos agregados con el objetivo de establecer relaciones con el desgaste por máquina de los ángeles, entregando resultados significativamente representativos a partir del análisis estadístico. De igual manera (Kahraman & Fener, 2007) presentan relaciones entre la resistencia a la compresión de los agregados y el desgaste por máquina de los ángeles, destacando que el mejor ajuste se logra al separar dos grupos, respecto a su porosidad: mayores y menores a 5%. Los resultados de las características de los agregados se presentan en la Tabla 5-2, observando que los de origen ígneo son los de menor desgaste con mayores resistencias a la compresión, seguidos por los metamórficos y de manera general los sedimentarios son los de menores prestaciones frente al desgaste por máquina de los ángeles.

Tabla 5-2 Propiedades de los agregados: desgaste, densidad, absorción, resistencia la compresión por tipo y origen del material.

Autor	Tipo	Origen	Desgaste %	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Absorción %	f'a MPa
(S. Kahraman & Fener, 2007)	Basalto	Ígneo	17.2	2.58	5.5	202
	Granite	Ígneo	15.7	2.63	1.15	133
	Serpentinita	Metamórfico	15.9	2.75	0.91	210
	Migmatita	Metamórfico	16.6	2.49	1.33	203
	Cuarzo	Metamórfico	20.2	2.72	0.85	111
	Anfibolita	Metamórfico	22.3	2.69	1.9	186
	Caliza	Sedimentario	24.7	2.57	0.93	175
	Dolomita	Sedimentario	25.0	2.58	0.31	136
	Mármol	Metamórfico	28.8	2.67	0.06	73
	Travertino	Sedimentario	31.4	2.4	3.12	83
	Caliza	Sedimentario	33.3	2.56	0.69	128
	Granite	Ígneo	33.7	2.55	0.62	114
	Granite	Ígneo	34.7	2.47	0.98	89
	Esquistos	Metamórfico	37.7	2.75	1.95	70
	Travertino	Sedimentario	39.0	2.29	4.04	50
(Ugur et al., 2010)	Caliza	Sedimentario	25.8	2.63	1.84	91
	Andesita	Ígneo	20.2	2.28	7.76	82
	Caliza	Sedimentario	23.5	2.67	0.57	100
	Caliza	Sedimentario	23.9	2.68	0.34	119
	Travertino	Sedimentario	24.5	2.52	4.58	84
	Travertino	Sedimentario	26.0	2.45	2.13	68
	Mármol	Metamórfico	26.7	2.70	0.25	98
	Mármol	Metamórfico	30.7	2.70	0.30	70
	Mármol	Metamórfico	33.6	2.69	0.38	126
	Caliza	Sedimentario	34.3	2.38	8.98	73
	Travertino	Sedimentario	37.8	2.40	2.61	36
	Travertino	Sedimentario	40.9	2.12	6.59	20

Los agregados débiles tienden a ser altamente absorbentes y se hinchan cuando están saturados, agregados susceptibles a altos resultados de descomposición química (sanidad por sodio y magnesio) presentan mayores desgastes, en especial cuando se presenta una gran alteración a la superficie, lo que permite que se desprendan partículas de la superficie estableciendo planos de falla e induciéndolo (Kazi & Al-Mansour, 1980). Para lograr los tamaños de agregado requeridos en la elaboración de concreto, se deben someter a procesos mecánicos donde se trituran hasta llegar al tamaño deseado, los agregados de menor tamaño tendrán mejor desempeño ya que por lo general corresponden a partículas desprendidas de otras de mayor tamaño, sufriendo menos en el proceso de reducción de tamaño, quedando con menos fisuras en su matriz (Alexander & Mindess, 2010).

Conocidas las propiedades de los agregados, se pretende establecer relaciones de su desempeño en el concreto, es por ello que el estudio realizado por (Beshr et al., 2003) presenta la influencia del desgaste a la abrasión del agregado grueso en la resistencia a la compresión del concreto, revelando la naturaleza débil de los agregados calizos, seguidos de las dolomitas y la escoria de acero, de manera que agregados más frágiles entregaran concretos más dúctiles

capaces de presentar mayor deformación antes de llegar a la caga final. (Laplante, 1991) concluye que las propiedades mecánicas del concreto están relacionadas a las propiedades del agregado, en especial el desgaste a la abrasión de los agregados, siendo este ensayo un estimativo de la rigidez de este. De manera que los de menor desgaste, son los que arrojan mejores prestaciones, sin ser este, el único parámetro para establecer la manera en cómo se desarrollan las propiedades mecánicas del concreto.

Tabla 5-3 Resistencia de concretos a la compresión, por tipo de agregado y desgaste por máquina de los ángeles.

Autor	Tipo de agregado	f'c-c MPa	Desgaste %
(Laplante, 1991)		A/C = 0.32	
	Basalto	82.0	14.6
	Dolomita	77.2	18.9
	Granito	79.0	21.9
	Calizo	81.9	28.7
(Beshr et al., 2003)	Escoria	55.0	11.6
	Cuarzo	45.2	19.2
	Dolomita	44.5	24.2
	Calizo	43.0	34.4

#### 4.2.5 Tamaño del agregado

Una de las principales maneras de caracterizar un agregado es la gradación que está asociada a un tamaño máximo, el cual es uno de los criterios en las especificaciones del concreto. Producto del trabajo realizado por (Caliskan & Karihaloo, 2004) establecen que a medida que el tamaño del agregado incrementa el aporte de la rugosidad en la ITZ pierde relevancia independiente del tipo de agregado. Este argumento es respaldado por los resultados entregados por (Su & Bei, 2008), donde, el tamaño máximo del agregado si posee una pequeña influencia en la capacidad a compresión a compresión de concretos con resistencias ultimas inferiores a 60 MPa, de manera que a mayor tamaño se presenta una leve reducción en los valores obtenidos; este efecto es casi nulo en concretos superiores a los 80 MPa.

El estudio realizado por (Yildirim & Sengul, 2011) propone un comportamiento para los agregados de menor tamaño, en los que la reducción de su tamaño aumenta el número de partículas para el mismo volumen, incrementando el área superficial del agregado, permitiendo mayor contacto entre el estos y la matriz del concreto, el cual en mezclas con relaciones A/C altas es uno de los puntos más débiles, dando paso a la generación y propagación de las micro fisuras en este plano.

### 5.3 Módulo de Elasticidad del Concreto

Las propiedades mecánicas de un material son aquellas que están asociadas con reacciones elásticas e inelásticas cuando una fuerza es aplicada, o que involucran relaciones entre esfuerzo y deformación (ASTM, 2009). El módulo de elasticidad es una de estas propiedades; que consiste en la relación entre el esfuerzo y la deformación dentro de los límites elásticos del material.

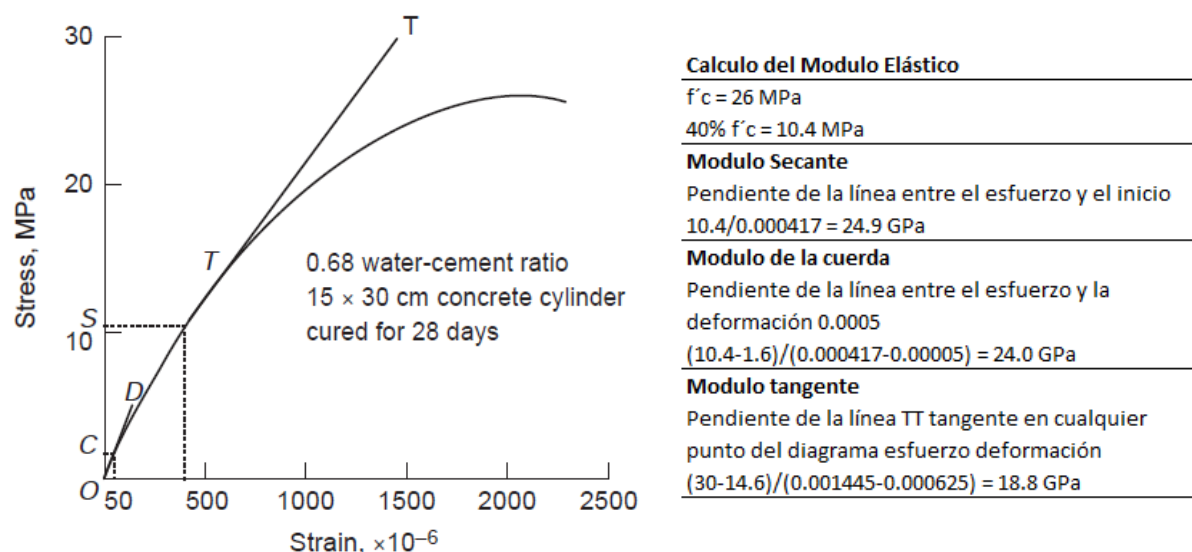


Figura 5-6. Tipos diferentes del módulo de elasticidad y la manera en cómo son definidos. (Mehta & Monteiro, 2006).

La Figura 5-6 presenta diferentes tipos de módulos elásticos que se pueden calcular, mostrando gráficamente las diferencias entre cada uno. El módulo de elasticidad tangente resulta de la tangente sobre la curva de esfuerzo deformación, desde el punto de deformación cero hasta cualquier parte del gráfico; el módulo de elasticidad secante se establece por la pendiente de una línea trazada desde el origen, hasta un punto establecido, usualmente el 40% de la resistencia a la compresión. El módulo de la cuerda consiste en la pendiente de una línea trazada entre dos puntos de la curva de esfuerzo deformación, la diferencia con el módulo secante, es que esta arranca en el punto en el cual la deformación es de:  $50 \mu\text{m/m}$ , de manera que se pueda corregir la pequeña la concavidad generada en el comienzo de la curva.

Se han creado modelos empíricos producto de investigaciones realizadas por diferentes instituciones y organismos estatales, que son presentados por (Bilir, 2016) y (Vakhshouri & Nejadi, 2019) como parte de la revisión de literatura de algunos modelos disponibles. La Tabla 5-4, presenta las ecuaciones de distintos modelos como es el caso de ACI 318, código noruego, euro código entre otros, donde la mayoría de estos están relacionados respecto a la resistencia, usualmente la raíz cuadrada, muy pocos con intercepto en el eje Y y algunos con alternativas como la masa unitaria del concreto para los casos en los que se tenga acceso a esta información.

Tabla 5-4 Ecuaciones de módulo de elasticidad de diferentes códigos e investigaciones.

Código	Ecuación	Especiales	Rango aplicación
(ACI 318, 2014)	$E_c = 4730\sqrt{f'_c}$	$E_c = 4730\sqrt{f'_c}$	$f'_c < 50 \text{ MPa}$
(ACI 363, 1997)	$E_c = 3650\sqrt{f'_c}$	$E_c = 3650\sqrt{f'_c} + 6900 \left(\frac{w}{2246}\right)^{1.5}$	$21 < f'_c < 83 \text{ MPa}$
(NSR-98, 1998)	$E_c = 3900\sqrt{f'_c}$	$E_c = 0.034w^{1.5}\sqrt{f'_c}$	
(NSR-10, 2010)	$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$	-	
(CEB-FIP, 2003)	$E_c = 10000(f'_c + 8)^{\frac{1}{3}}$	-	
(CSA-A23, 2004)	$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$	$E_c = (3300\sqrt{f'_c} + 6900)\left(\frac{w}{2300}\right)^{1.5}$	$20 < f'_c < 40 \text{ MPa}$
(AASHTO, 2006)	$E_c = 0.043w^{1.5}\sqrt{f'_c}$	$E_c = 0.034w^{1.5}\sqrt{f'_c}$	$14 < f'_c < 48 \text{ MPa}$
(FHWA, 2000)	$E_c = 3873\sqrt{f'_c}$	-	$28 < f'_c < 193 \text{ MPa}$
(AS-3600, 2009)	$E_c = 5050\sqrt{f'_c}$	$E_c = 0.043w^{1.5}\sqrt{f'_c}$	$f'_c < 40 \text{ MPa}$
(AS-3600, 2009)		$E_c = w^{1.5}(0.024\sqrt{f'_c} + 0.12)$	$f'_c > 40 \text{ MPa}$
(JSCE, 2010)		$E_c = 10.792 \ln f'_c - 9.0675$	$18 < f'_c < 80 \text{ MPa}$
(EHE, 1998)	$E_c = 10000\sqrt[3]{f'_c}$	-	
(NBR-6118, 2003)	$E_c = 5600\sqrt{f'_c}$	-	
TS-500(TS-500, 2000)	$E_c = 3250\sqrt{f'_c} + 1400$	-	
(NBR-6118, 2003)	$E_c = 5000\sqrt{f'_c}$	-	
(BS-5400-4, 1990)	$E_c = 8.6475(f'_c)^{0.348}$	-	$20 < f'_c < 60 \text{ MPa}$
(BS-5400-4, 1990)	$E_c = 20 + 0.2f'_c$	-	$20 < f'_c < 60 \text{ MPa}$
(EN 1992-1-1, 2004)	$E_c = 22000 \left(\frac{f'_c}{10}\right)^{0.3}$	-	

Definir una ecuación que represente el comportamiento general del módulo de elasticidad, es complicado, ya que los modelos propuestos son parámetros propios del mecanismo utilizado para el ensayo y las propiedades del diseño de mezclas (Domingo et al., 1985).

#### 4.3.1 Incidencia del módulo de elasticidad del agregado

La deformación del concreto elaborado con varios agregados depende principalmente del módulo de elasticidad y composición del agregado. El trabajo realizado por (Piasta et al., 2017) concluye que, los concretos realizados con agregado de dolomita son de los que presenta mejores módulos de elasticidad, con menores esfuerzos de tensión en la ITZ; caso contrario al cuarzo que, aunque tuviese módulos de elasticidad de la roca similar a la dolomita la tensión es muy alta en la ITZ debilitando la zona de contacto generando mayores deformaciones. El tener resistencias a la compresión similares obtenidas con distintos agregados, no garantiza que su deformación con la aplicación de cargas se la misma, como se presenta en la Tabla 5-5 donde se elaboraron concretos con agregado de basalto, granito y cuarcita, mostraron resultados radicalmente diferentes: el módulo más alto, el módulo más bajo y la resistencia

más alta a compresión sin ser el de mayor módulo de elasticidad, respectivamente. Por lo tanto, se puede inferir que el módulo de elasticidad del agregado no debe ser el único resultado para estimar las propiedades de deformación del concreto.

El estudio realizado por (Bentz et al., 2017) evaluó diferentes propiedades de los agregados en busca de encontrar la propiedad que mejor describiera el módulo de elasticidad del concreto, concluyendo que no hay una sola propiedad capaz de estimar este comportamiento. En cambio, una combinación de propiedades de agregado y matriz parece tener una influencia en las propiedades del concreto, especialmente aquellas que afectan la unión entre el agregado y la pasta, como la textura del agregado, el módulo de elasticidad, la porosidad y la absorción, así como el módulo de elasticidad de la pasta.

Tabla 5-5 Influencia del módulo de elasticidad por origen de agregado en el módulo de elasticidad del concreto.

Autor	Agregado	Ea (GPa)	Ec (GPa)	f'c concreto (MPa)
(Bentz et al., 2017)	Granito	40.0	32.6	52.4
	Dolomita Caliza	44.1	47.0	52.5
	Micrita Caliza	54.4	41.7	50.5
	Granito gneis	54.4	27.6	46.3
	Cuarzo y arenisca	62.9	33.6	48.4
	Caliza absorbente	71.6	34.2	52.7
	Diabasa	73.4	40.9	53.7
	Dolomita	79.4	45.8	50.3
	Meta-Basalto	92.4	31.7	51.1
	Grava	97.3	33.6	37.9
	Mármol	102.7	49.3	51.1
(Piasta et al., 2017)	Canto rodado		31.6	54.5
	Granito	28.0	29.0	54.3
	Cuarzo	63.8	32.1	65.0
	Dolomita	74.2	40.8	60.3
	Basalto	100.8	42.9	61.2

### 4.3.2 Modelos propuestos por tipo y procedencia del agregado

El módulo de elasticidad del concreto frecuentemente se expresa en términos de la resistencia ultima a la compresión  $f'_c$ , al mismo tiempo se han realizado estudios en los que se identifica la influencia de otros parámetros, por lo que, se han desarrollado modelos compuestos capaces de tener en cuenta el efecto de estas propiedades del concreto. Para ello se han relacionado distintas variables como los volúmenes de agregado, módulos de elasticidad de los agregados, módulos de elasticidad de la matriz entre otros, es por ello que (T Noguchi & Nemat, 1990) realizan una investigación con más de 3.000 datos con un espectro de resistencias entre los 20 a 160 MPa con agregados de diferentes orígenes, con el objetivo de proponer un modelo único asociado a unos factores por tipo de agregado, capaz de ser aplicable de manera genérica y no solo en las regiones de donde se obtuvo el agregado. La Tabla 5-6 presenta algunos de los

modelos propuestos como resultado de diferentes investigaciones, los cuales son válidos y entregan resultados acertados cuando son evaluarlos en la condición local en la que fueron desarrollados.

$$E_c = \alpha_e \left( \frac{f'_c}{k} \right)^b$$

Tabla 5-6 Ecuaciones de módulo de elasticidad de diferentes códigos e investigaciones, por origen y tipo de agregados.

CODIGO	ECUACION	COEFICIENTE	
NSR – 10	$E_c = \alpha_e \sqrt{f'_c}$	Ígneo	5500
		Metamórfico	4700
		Sedimentario	3600
CEB-FIP	$E_c = \alpha_e \left( \frac{f'_c}{8} \right)^{0.3}$	Basalto, Calizas densas	25800
		Cuarcitas	21500
		Calizas	19350
		Areniscas	15050
		Calizas	19350
EN-1992-1-1	$E_c = \alpha_e \left( \frac{f'_c}{10} \right)^{0.3}$	Areniscas	15050
		Basalto, Calizas densas	1580
		Calizas	4400
		Basalto	3500
NMX	$E_c = \alpha_e \sqrt{f'_c}$	Andesita	2500
		Calizas	96.65
		Andesitas	101.88
Mostofinejad & Nozhati	$E_c = \alpha_e (f'_c)^{0.316}$	Cuarcitas	3854
		Calizas	4324
Iravani	$E_c = \alpha_e \sqrt{f'_c}$	Cuarcitas	4559
		Granito	3854
		Grava de Río	7900
(Noguchi & Nemati, 1990)	$E_c = \alpha_e \sqrt[3]{f'_c}$	Grauvaca	7877
		(sedimentaria)	
		Cuarcita	7319
		(metamórfica)	
		Caliza	9488
		(sedimentaria)	
		Andesita (ígneas)	7091
		Basalto (ígneas)	7248
		Arenisca	7295
		Canto rodado	7507
		Escoria	7759
		Bauxita calcinada	9142

### 4.3.3 Ecuaciones en Colombia

Como se ha mencionado anteriormente cada ecuación propuesta esta asocia a las condiciones locales en las que se realizaron los ensayos y los materiales utilizados, es por ello, que se han planteado distintas ecuaciones capaces de estimar el valor del módulo de elasticidad. La Tabla 5-7 presenta los resultados de trabajos realizados en Colombia, los cuales representaran de mejor manera el comportamiento con las condiciones locales evaluadas, como las propiedades de los cementantes y los agregados disponibles en el país. El trabajo de grado realizado por



(Amézquita et al., 1995) analizo más de 2000 resultados de concretos realizados con agregados de distintas ciudades de Colombia, proponiendo la siguiente ecuación para estimar el módulo de elasticidad del concreto  $E_c = 3900\sqrt{f'_c}$  la cual se implementó en el código de diseño colombiano (NSR-10, 2010).

Tabla 5-7 Ecuaciones de módulo de elasticidad de investigaciones en Colombia.

AUTOR	AÑO	ECUACION
(Farias Moreno, 1992)	1992	$E_c = 3250\sqrt{f'_c}$
(Cortés et al., 1995)	1995	$E_c = 3900\sqrt{f'_c}$
(Ruiz et al., 2013b)	2007	$E_c = 3320\sqrt{f'_c}$
(Ramírez, 2011)	2011	$E_c = 3970\sqrt{f'_c}$
		$E_c = 7200^3\sqrt{f'_c}$
(Quimbay Herrera, 2016)	2012	$E_c = 4730\sqrt{f'_c}$
(Ruiz et al., 2013a)	2013	$E_c = 3386\sqrt{f'_c}$

El trabajo realizado por (Ruiz et al., 2013b) estimo la incertidumbre aleatoria de la distorsión sísmica de entrepiso en pórticos de concreto reforzado, considerando la variación del módulo de elasticidad del concreto en Bogotá; para esto se evaluaron más de 1.500 resultados obtenidos de una base de datos estableciendo la siguiente ecuación :  $E_c = 3386\sqrt{f'_c}$ , a la que se le asocio una desviación, simulando el impacto de la variación de este parámetro en diferentes edificaciones frente a distintos sismos. Dentro del análisis realizado no se contaba con las propiedades del diseño de mezcla del concreto, siendo analizados como un solo conjunto.

Dentro de las conclusiones presentan que los valores de módulo de elasticidad oscilan entre 33.770 MPa y 2.373 MPa con resistencias entre los 80.3MPa y los 6.4 MPa, cuyos resultados están por debajo de lo propuesto por el código colombiano el cual plantea  $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$  como una de las alternativas para el diseño estructural. Con la ecuación propuesta para las condiciones locales y bajo el análisis de 3 sismos se espera que 67 de cada 100 estructuras de cinco pisos tendrán deformaciones superiores al 1% sometidas a las fuerzas sísmicas estimadas en la microzonificación.

#### 4.3.4 Tamaño del agregado

Producto del trabajo realizado por (Caliskan & Karihaloo, 2004) se presenta que, a medida que el tamaño del agregado disminuye, aumenta el área de contacto con la matriz capaz de

modificar la condiciones de ITZ con la matriz, pero a medida que el tamaño del agregado incrementa el aporte de la rugosidad en la ITZ pierde relevancia independiente del tipo de agregado. El estudio realizado por (Su & Bei, 2008) concluyo que concretos realizados con TM de 10 mm y 20 mm arrojan módulos de elasticidad muy similares, proponiendo un solo modelo sin identificar el tamaño como parámetro influyente en los resultados. Una conclusión similar fue reportada por (Yildirim & Sengul, 2011) en la que se realizaron mezclas con distintas relaciones A/C, manteniendo fija la relación volumétrica del agregado y variando el TM de los agregados; reportando que entre reducciones en el TM de los agregados entre 32mm, 16mm y 8 mm no afectan significativamente el módulo de elasticidad como se observa en la Figura 5-7 donde solo el tamaño más pequeño evaluado es el que presenta una reducción en los resultados obtenidos y cuyo tamaño es de 4 mm catalogado como arena por la (NTC174, 2018).

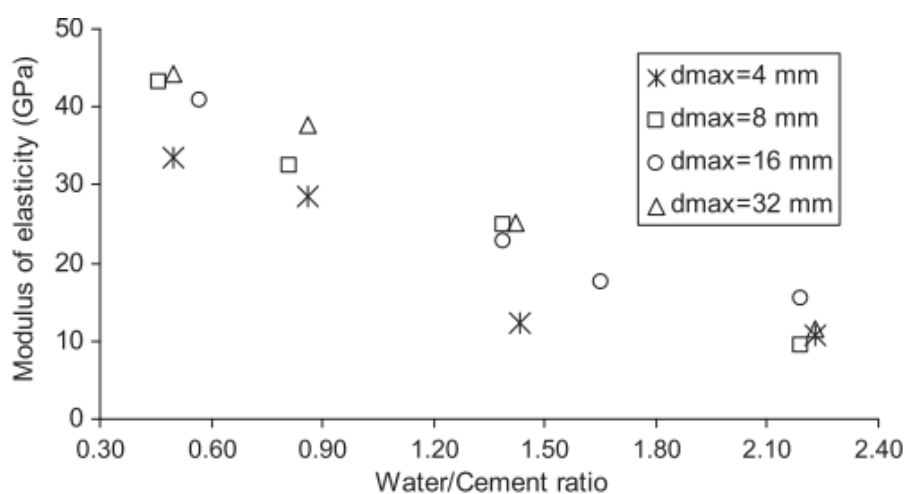


Figura 5-7 Efecto del tamaño máximo del agregado TMN en el módulo de elasticidad del concreto.

#### 4.3.5 Forma y superficie

(Caliskan & Karihaloo, 2004) presentan los resultados del estudio realizado a tres agregados con el fin de determinar la influencia de la rugosidad de la superficie en las propiedades del concreto, de los materiales evaluados las areniscas poseen la mayor rugosidad, seguida de la caliza y por último el granito. Presentando una relación en la que la rugosidad de la superficie es inversamente proporcional a la rigidez del agregado.

El trabajo realizado por (Hong et al., 2014) concluye que el concreto con agregados con superficies ásperas producen mejores propiedades mecánicas con un límite, de manera que al llegar a un valor de rugosidad no aumentaran estas propiedades a partir de este parámetro.

#### 4.3.6 Desgaste

La calidad del agregado tiende a influir en el módulo de elasticidad del concreto, donde los agregados frágiles producen concretos más dúctiles que los agregados de más rígidos, para

ello (Beshr et al., 2003) realizo diseños mezclas con cuatro tipos de agregados contando con información de % de desgaste por máquina de los ángeles de cada uno, encontrando una relación inversa entre este parámetro y el módulo de elasticidad. La Tabla 5-8 presenta los resultados del módulo de elasticidad y el % de desgaste asociado al tipo de agregado, siendo los elaborados con caliza los de menor modulo y mayor desgaste.

Tabla 5-8 Propiedades mecánicas del concreto, asociado al tipo de agregado y su % de desgaste.

<b>Autor</b>	<b>Tipo de agregado</b>	<b>f'c</b> MPa	<b>Ec</b> MPa	<b>Desgaste</b> %	<b>f't</b> MPa
(Beshr et al., 2003)	Calizo	43.0	20,500	34.4	2.4
	Dolomita	44.5	22,500	24.2	3.1
	Cuarzo	45.2	27,000	19.2	3.1
	Escoria	55.0	28,000	11.6	4.0

La Tabla 5-9 presenta los principales tipos de agregados disponibles en Colombia con sus características por tipo y origen, especialmente el desgaste por máquina de los ángeles, de manera que se pueda estimar un comportamiento asociado del módulo de elasticidad a partir del tipo de agregado, observando que los calizos son los de mayor desgaste, siendo estos los de menor módulo de elasticidad en el concreto como se presenta en la tabla anterior.

Tabla 5-9 Características físicas por tipo y origen de los agregados.

<b>Autor</b>	<b>Tipo</b>	<b>Origen</b>	<b>Desgaste</b> %	<b>Densidad</b> kg/m <sup>3</sup>	<b>Absorción</b> %
(Kazi & Al-Mansour, 1980)	Basalto	Ígneo	7-25	3.0-2.6	0.0-2.3
	Cuarzo	Metamórfico	9-25	2.7-2.6	0.3-1.3
	Granito	Ígneo	9-35	3.0-2.6	0.2-0.9
	Caliza	Sedimentario	11-37	2.8-2.5	0.2-2.9

## 5.4 VPU

La velocidad de pulso ultrasónico (PVU) en concreto, es uno de los ensayos no destructivos más utilizado realizado para estimar propiedades del concreto en estado endurecido, cuyo resultado depende de muchas variables, especialmente la manera como se funden los elementos, identificando discontinuidades, uniformidad del concreto, propiedades mecánicas del concreto y cambios de las propiedades del concreto en el tiempo (NTC1377, 2010).

El tipo, la cantidad de agregado, la forma del agregado y la cantidad de este presentan influencias en los resultados de VPU del concreto, que junto a las propiedades del concreto como su relación a/c y su resistencia a la compresión, permitirán establecer relaciones capaces de explicar y predecir su comportamiento.

#### 4.4.1 Incidencia del Agregado

La influencia del tipo de agregado en la velocidad de pulso ultrasónico VPU ha sido estudiada por diferentes autores, presentando relaciones entre la lectura a la matriz del agregado y su desempeño en el concreto elaborado con este, (Facaoaru, 1970) reporto los resultados de VPU de diferentes rocas y su resultado en concretos realizados con este material asociado a una resistencia a la compresión obtenida, mostrando una relación directa entre la VPU del agregado con la del concreto realizado con este, cuyos valores se presentan en la Tabla 5-10.

Tabla 5-10 Influencia de la velocidad de pulso ultrasónico por tipo de agregado en la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia en el concreto.

<b>Tipo de agregado</b>	<b>VPU m/s – agregado</b>	<b>VPU m/s – concreto</b>	<b>Resistencia MPa Concreto</b>
Siderita	6000 – 6200	4500 – 4600	27.5 – 28.5
Barita	3700 – 3900	3200 – 3300	25.5 – 25.6
Serpentina	4300 – 4700	3900 – 4000	18.3 – 20.4
Cuarzo – Canto rodado	5600 - 6000	4300 – 4400	40.8 – 42.8

(Lee & Lee, 2020) presenta el resultado de VPU diferenciando entre mortero y concreto, ambas con una tendencia a incrementar en el tiempo, siendo los resultados en concreto superiores alrededor de un 16% que los realizados en mortero. Este comportamiento se puede explicar por la participación volumétrica del agregado que representa cerca del 35% la cual es más alta que la del mortero.

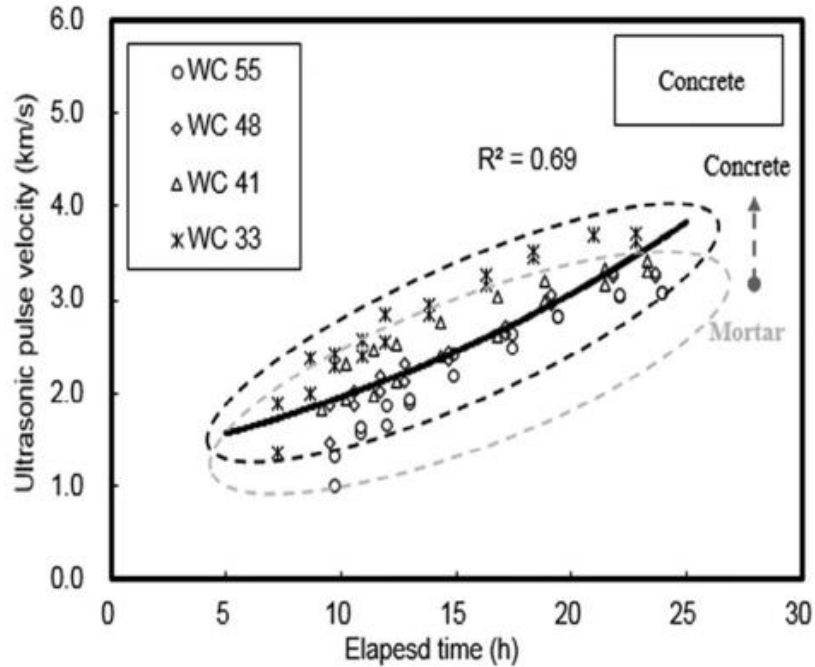


Figura 5-8 Velocidad de pulso ultrasónico a edades tempranas entre para el concreto y el mortero (Lee & Lee, 2020).

(Mohammed & Rahman, 2016) realizaron ensayos con tres tipos de agregados en los que variaron la relación arena/agregado encontrando que a medida que aumenta la proporción de arena disminuyen las lecturas de VPU, todo esto asociado al comportamiento de la ITZ, donde a mayor contenido de arena se logra una mejor compactación del concreto, logrando una mejor colocación a su vez un posible incremento en la resistencia a la compresión.

#### 4.4.2 Forma

Los resultados obtenidos de la investigación realizada por (Güçlüer, 2020) establece la relación directa entre la relación de aspecto (AR) y la redondez (R) del agregado con los resultados de VPU, presentado dos modelos capaces de explicar el comportamiento. Esto debido a que la rugosidad del agregado permite que sea más rápido el movimiento de VPU por el concreto, asociado con la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado que fortalece la ITZ.

$$VPU = 0.5664AR + 3.4536 (R^2 = 0.83) \quad (1)$$

$$VPU = 0.6429R + 3.61 (R^2 = 0.87) \quad (2)$$

#### 4.4.3 Tamaño del agregado

El tamaño del agregado si presenta una influencia en los resultados de VPU como lo demuestran (Mohammed & Mahmood, 2016) en la que concluyen que este valor aumenta a medida que el tamaño máximo del agregado lo hace, presentando una diferencia alrededor 3100 m/s entre agregados ½” y 1 ½”.

#### 4.4.4 Resistencia

Dada la importancia del ensayo de ultrasonido para estimar la resistencia a la compresión del concreto, (Solís-Carcaño & Moreno, 2008) realizaron más de 100 mezclas estableciendo un gradiente promedio de 0.006 MPa m/s, cuya relación directa es respaldada por el estudio realizado por (Güçlüer, 2020). (Lee & Lee, 2020) proponen un modelo capaz de estimar la resistencia a la compresión a las primeras horas a partir del ensayo de VPU, entregando un comportamiento parabólico hasta el fraguado final, luego de este se puede esperar un comportamiento lineal. De los resultados obtenidos por (Mohammed & Rahman, 2016) se observa que independiente del tipo de agregado, la resistencia a la compresión y las lecturas de VPU aumentan con la reducción de la relación A/C. Los diferentes modelos propuestos para la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad se presentan en la Tabla 5-11, los cuales poseen como parámetro de entrada la lectura de PVU del concreto.

Tabla 5-11 Modelos para estimar las propiedades mecánicas del concreto a partir de la lectura de VPU del concreto.

AUTOR	CARAC	MODELO $f'_c$	MODELO $E_c$	UNIDAD
(Solís Carcaño & Moreno, 2008)	< 46 MPa	$f'_c = 0.5697e^{(0.001VPV)}$		m/s
(NTC1377, 2010)	General		$E_c = 317.05e^{(1.0168VPV)}$	km/s
(Yildirim & Sengul, 2011)	General		$E_c = 6e^{(0.076VPV^2)}$	m/s
(Quintero Ortiz et al., 2014)	A/C =0.5	$f'_c = -129.5 + 0.041VPV$		m/s
(Mohammed & Mahmood, 2016)	TM 25	$f'_c = 0.226e^{(1.32VPV)}$	$E_c = 1335e^{(0.186VPV^2)}$	km/s
(Mohammed & Mahmood, 2016)	Caliza	$f'_c = 1.11502e^{(0.0007VPV)}$	$E_c = 9394e^{(0.0514VPV^2)}$	km/s
(Shih, T et al., 1989)	H iniciales		$E_c = 1.25e^{(0.04VPV)}$	m/s

En pro de tener herramientas que sean capaces de establecer un comportamiento esperado del concreto, (Malhotra, 1976) establece una clasificación a partir de la lectura de VPU presentada en la Tabla 5-12, siendo los concretos < 20 MPa los que se califican como cuestionables, entre 20 y 28 MPa como buenos y excelente superiores a 28 MPa como valor medio.

Tabla 5-12 Clasificación del concreto basado en el resultado del pulso ultrasónico (Malhotra, 1976)

Velocidad de pulso (m/s)	Clasificación del concreto
$V > 4575$	Excelente
$4575 > V > 3660$	Bueno
$3660 > V > 3050$	Cuestionable
$3050 > V > 2135$	Pobre
$V < 2135$	Muy pobre

#### 4.4.5 Relación A/C

La relación A/C presenta una relación directa con la velocidad de pulso ultrasónico, de manera que al mantener las demás características del concreto iguales, el disminuir esta relación entregara mayores velocidades (Kaplan, 1959). Producto de la investigación realizada por (Del Río et al., 2004) se plantea en la ecuación ( 3 ) en la que la velocidad a la que recorre el pulso ultrasónico sobre el concreto aumenta con la disminución de la relación a/c, resaltando que el modelo prevé unos límites superiores e inferiores en los que se espera que se encuentre el resultado a estimar. De igual manera el trabajo realizado por (Herrera & Corzo, 2011) con agregados de Colombia presenta una relación para estimar la resistencia del concreto a partir de la relación a/c, presentada en la ecuación ( 4 ).

$$VP_U = 5160 \mp 250 + (-1000 \mp 400 * a/c) \quad (3)$$

$$VP_U = 4728.81 - 2207.51 * Agua/Cemento \quad (4)$$

## 5.5 Deformación al esfuerzo máximo $\epsilon_0$

Como se ha presentado, el concreto presenta deformaciones a lo largo de la aplicación de cargas, unas de ellas recuperables y otras no, que al superar un umbral son permanentes llegando hasta la falla. A lo largo de este recorrido se obtiene la capacidad máxima a compresión, la cual está asociada a una deformación  $\epsilon_0$ ; denotando que, al superar este valor, el concreto no será capaz de aumentar su capacidad a la compresión como se aprecia en la Figura 5-9.

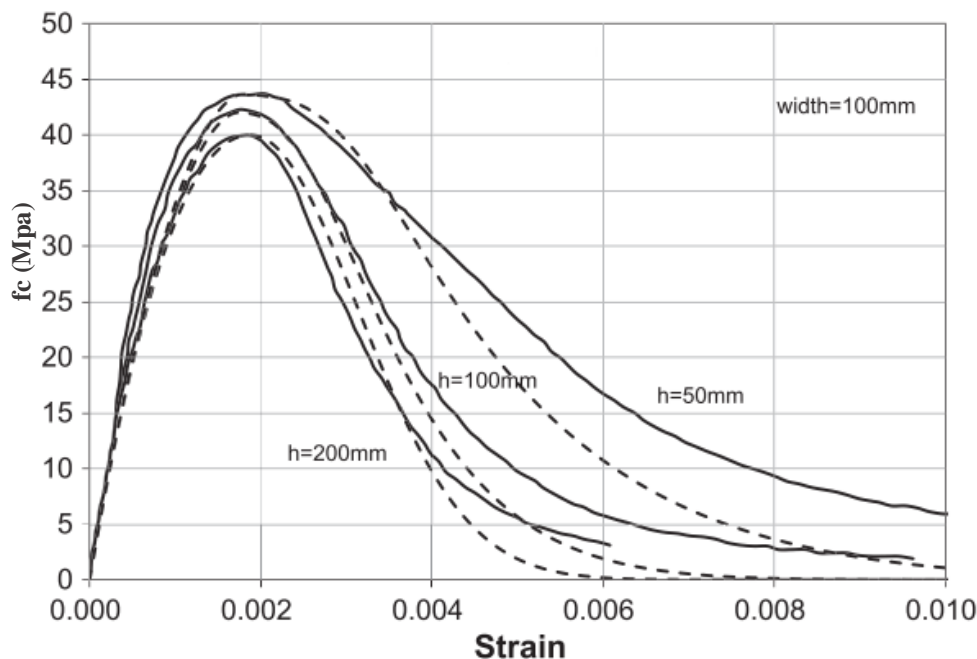


Figura 5-9 Curva de esfuerzo deformación en ensayos a compresión uniaxial, ensayos realizados a cilindros de diferentes alturas. (Vonk, n.d.)

El valor pico de deformación al esfuerzo máximo en la mayoría de los códigos se encuentra entre 0.002 mm/mm a 0.003 mm/mm. La investigación realizada por (Hognestad & Wanson, N, 1955) permitió establecer en el código americano ACI  $\epsilon_0 = 0.002$  mm/mm como valor a utilizar en el diseño estructural. El valor para  $\epsilon_0$  depende de las condiciones de ensayo y de las propiedades de la mezcla. Dentro de los factores que afectan el ensayo se encuentran: la rigidez del equipo de ensayo, tamaño y forma del espécimen ensayado, rata de deformación y equipo de lectura de deformación entre otras. En cuanto a la mezcla alguno de los factores que influyen en el resultado son: la relación agua/cemento, características y contenidos de cemento, masa unitaria del concreto, tipo y contenido de agregado, teniendo en cuenta las condiciones de curado (Domingo et al., 1985). La investigación realizada por (Tasdemiry et al., 1998) presenta los resultados de 228 ensayos de otros autores, presentando una ecuación polinomial para el cálculo de este parámetro en la Tabla 5-13, de manera que, al aumentar la capacidad de carga, se incrementara la deformación alcanzada.



(Vilardell et al., 1998) realizo ensayos de esfuerzo deformación, en los que separo el comportamiento del concreto y la matriz a diferentes edades, encontrando que en el mortero posee deformaciones alrededor de 0.0025 mm/mm mientras el concreto se encuentra cercano al 0.002 mm/mm, de manera que los agregados y la manera en cómo estos interactúan con la matriz modifican y rigen el comportamiento de deformación al esfuerzo máximo.

Tabla 5-13 Modelos para estimar la deformación al esfuerzo máximo ec.

Autor	Ecuación
(Attard & Setunge, 1996)	$\varepsilon_0 = \frac{f'_c}{E_c} \frac{4.26}{\sqrt[4]{f'_c}}$ agregado angular
	$\varepsilon_0 = \frac{f'_c}{E_c} \frac{3.78}{\sqrt[4]{f'_c}}$ agregado canto rodado
(Domingo et al., 1985)	$\varepsilon_0 = (0.71 * f'_c + 168) / 100000$
(Jansen & Shah, 1996)	$Prom = 0.002$
	$\sigma = 0.00014$
(Tasdemiry et al., 1998)	$\varepsilon_0 = (-0.067f'_c{}^2 + 29.9f'_c + 1053)10^{-6}$

Definir una ecuación que represente el comportamiento general de la curva de esfuerzo deformación, es complicado, ya que el resultado de cada curva corresponde a las condiciones en las que se realizó el ensayo, obteniendo resultados que son parámetros distantes a la propia mezcla de concreto. (Domingo et al., 1985) presenta las condiciones que debe cumplir una ecuación que represente la curva de esfuerzo-deformación: ser comparada favorablemente con datos reales ejecutados cuidadosamente, mostrar el ascenso y descenso de la gráfica, debe basarse en relaciones físicas, en la deformación al esfuerzo máximo la expresión debe ser con pocos parámetros y fácilmente evaluada. Todo esto usando expresiones basada en:  $f'_c$ , que es el máximo esfuerzo,  $\varepsilon_{c0}$ , que es la deformación al esfuerzo máximo,  $E_c$  es el módulo de elasticidad y  $E_u$ , es el módulo tangencial desde 0 hasta el esfuerzo máximo.

### 4.5.1 Superficie de contacto

La investigación realizada por (Hong et al., 2014) evaluó la influencia de la rugosidad superficial de un agregado en las propiedades mecánicas del concreto, para ello fabrica tres tipo de agregados, uno con la superficie lisa, rugosa y con hendiduras, encontrando que no se modifica el valor de  $e_0$  ya que para la generación y propagación de las microgrietas se presenta por la ITZ y continúan a lo largo del mortero. Lo que si influye es en la manera en cómo se disipa la energía, modificando la tenacidad por tipo de superficie.

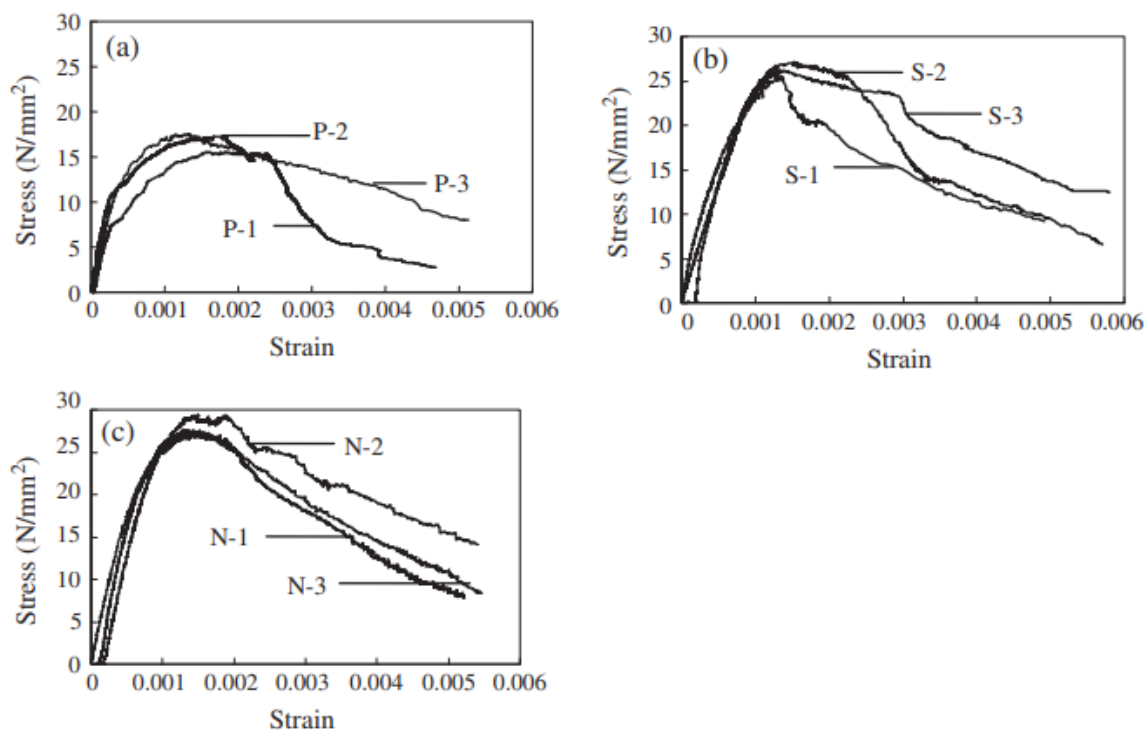


Figura 5-10 Curvas de esfuerzo deformación de bajo carga uniaxial a la compresión con diferentes condiciones de rugosidad en el agregado : a) Superficie lisa b) Superficie rugosa c) Superficie con hendiduras (Hong et al., 2014)

### 4.5.2 Tamaño del agregado

Del trabajo realizado por (Su & Bei, 2008) se concluyó que el valor de  $e_0$  es independiente del tamaño máximo del agregado para concretos con resistencia ultima inferior a 60 MPa, mientras que concretos en la que la resistencia ultima, es superior a los 80 MPa a mayor tamaño del agregado se presenta una reducción en la deformación al esfuerzo máximo.

## 5.6 Resistividad

La resistividad eléctrica ( $\rho$ ) de un material es su capacidad para resistir la transferencia de iones sometidos a un campo eléctrico la ecuación ( 5 ). La cual está definido por la relación entre la diferencia de potencial eléctrico (voltaje) y una corriente que atraviesa el sistema evaluado (intensidad), es por ello que es normalizado por las dimensiones y longitud del elemento de manera que se pueda caracterizar el comportamiento del material (Mehta & Monteiro, 2006).

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (5)$$

La presencia de grietas en el concreto va en contra de los parámetros asumidos en el ensayo, como la homogeneidad, que es isotrópico y sin grietas. Concretos con grietas conductivas y paralelas aumentan la resistividad del elemento medido, razón por la que es importante conocer a detalle el histórico de cargas de elemento y la posibilidad de presencia de fisuras.

El porcentaje de humedad y la temperatura durante el ensayo son de los parámetros que más influyen en el resultado de la resistividad eléctrica del concreto, siempre que sea realizado con el mismo equipo. (Sengul & Gjörv, 2008) presentan resultados de investigaciones donde se varía el método de curado y temperatura. Obteniendo que en los elementos que han sido curados sumergidos en agua, entregan valores más bajos que los que han estado expuestos al aire, de igual manera, a mayores temperaturas las lecturas disminuyen su magnitud.

### 5.6.1 Tamaño del agregado

Usualmente, la porosidad de la pasta de cemento para relaciones a/c mayores a 0.40, es mayor que la de los agregados, lo que permite que la corriente eléctrica se transporte con mayor facilidad a través del sistema interconectado de poros, lo que representa menores resistividades en la pasta de cemento que en los agregados (Sengul, 2014).

Par un mismo volumen de agregados, al incrementar el tamaño de estos, la superficie específica de los agregados disminuye, reduciendo consigo las zonas de interface entre el agregado y la pasta que son más porosas, aumentando la resistividad del concreto. Una posible causa adicional puede ser el efecto de tortuosidad. Los agregados fuerzan el flujo de corriente eléctrica alrededor de los agregados, reduciendo así el caudal, ya que como se me menciona se reducen estos caminos para el transporte de la corriente eléctrica. Tal efecto será más significativo en agregados más grandes, lo que también puede afectar la resistividad medida.

### 5.6.2 Contenido y tipo de agregado

Se identificó que el contenido y el tipo agregado tenían una influencia en la resistividad del hormigón (Azarsa & Gupta, 2017) . Un mayor contenido de agregado da como resultado valores de resistividad más altos debido a una menor porosidad y conductividad eléctrica. Además, se encontró que los agregados con textura superficial rugosa tienen mayor resistividad ya que su tortuosidad es mayor, limitando el flujo en el concreto, aumentando la durabilidad del elemento.

Los ensayos realizados por (Bentz et al., 2017) presentan los resultados de resistividad en concretos realizados con diferentes tipos de agregado, observando que cada uno de estos modifica la respuesta del ensayo, con una diferencia de hasta del 60% entre las condiciones más distantes como se observa en la Tabla 5-14.

Tabla 5-14 Influencia del origen del agregado en las propiedades fisicoquímicas del concreto.

Autor	Agregado	28 d ( $k\Omega \cdot cm$ )	$E_c$ (GPa)	$f'_c$ concreto (MPa)
(Bentz et al., 2017)	Granito gneis	4.1	27.6	46.3
	Caliza absorbente	4.2	34.2	52.7
	Grava	4.6	33.6	37.9
	Cuarzo y arenisca	5.0	33.6	48.4
	Dolomita	5.2	45.8	50.3
	Mármol	5.4	49.3	51.1
	Meta-Basalto	5.5	31.7	51.1
	Granito	5.8	32.6	52.4
	Diabasa	6.1	40.9	53.7
	Dolomita Caliza	6.3	47.0	52.5
	Micrita Caliza	6.7	41.7	50.5

### 5.6.3 Propiedades mecánicas del concreto

La resistencia a la compresión del hormigón y su resistividad eléctrica tienen una relación directa entre sí, ya que ambas dependen directamente de la porosidad de la matriz a una edad temprana como se observa en la Tabla 5-14, donde se aprecia esta leve tendencia.

En la revisión de la literatura no se evidencio una relación practica entre la resistividad y las propiedades mecánicas del concreto, ya que, a edades superiores a los 14 días, la conductividad de la solución de poros y el grado de saturación del hormigón influyen en esta relación, lo cual esta más asociado a las condiciones de exposición del concreto y no a los materiales utilizados para su elaboración (Azarsa & Gupta, 2017). De igual manera el estudio realizado por (Ramezaniapour et al., 2011) arroja una conclusión similar, debido a que este es un ensayo electro químico, es muy sensible a las condiciones locales, por lo que los modelos obtenidos para estimar la resistencia a la compresión presentaron mucha dispersión.

En condiciones controladas, donde las variaciones de humedad y temperatura no presenten variaciones el ensayo de resistividad eléctrica plantea alternativas interesantes en el control de las obras (Sengul & Gjörv, 2008), ya que es un ensayo de fácil aplicación con resultados que poseen una relación directa con las propiedades mecánicas, que aun requiere de mayor investigación, para entregar resultados concluyentes.

# Capítulo 6. Materiales y programa experimental

## 6.1 Materiales

En este capítulo se presentarán las propiedades de los materiales empleados en la fabricación de las mezclas a ser evaluadas en esta investigación, incluyendo su origen y la caracterización físico-mecánica. El material cementante usado fue cemento Portland clasificado como tipo I-II bajo la norma (NTC121, 2014) y los agregados naturales empleados corresponden a 5 fuentes de grava ubicadas en distintas regiones del país, y una arena empleada para todos los ensayos, proveniente de una de las fuentes de gravas seleccionadas. Con los materiales definidos se realizaron tres grupos de diseños, el primer grupo: “Convencionales” para resistencias entre los 20 a 50 MPa, el segundo: “Alta” entre los 60 a 90 MPa y el tercero “Especiales”, cuyo objetivo era evaluar la influencia de estas modificaciones en las propiedades del concreto, para ello, se usó microsílce, fibra de celulosa y se modificaron el porcentaje de caras fracturadas del agregado evaluado.

### 5.1.1 Cemento

El cemento Portland utilizado para esta investigación proviene de la empresa cementos ARGOS S.A., fabricado en la ciudad de Cartagena, cuya composición química se presenta en la Tabla 6-1, que muestra los resultados del ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX) y pérdidas ígneas. Dada las proporciones de Clinker-adición y los resultados presentados en la Tabla 6-1, el cemento se clasifica como tipo I-II bajo la norma (NTC121, 2014).

Tabla 6-1. Composición química por FRX y pérdidas al fuego del cemento tipo I-II. Fuente propia.

Elemento	Resultado
SiO <sub>2</sub>	20.57%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.55%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.10%
CaO	61.98%
MgO	1.13%
SO <sub>3</sub>	2.78%
Na <sub>2</sub> O	0.20%
K <sub>2</sub> O	0.38%
Na <sub>2</sub> Oeq	0.20%
Perdida Ígnea	2.38%
Cal libre	0.83%

Además de la información química, se presentan algunas características físicas del cemento como: finura Blaine (NTC 33, 2019), resistencia a la compresión a distintas edades (NTC 220, 2017), y tiempos de fraguado (NTC 118, 2019) como se muestran en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2. Caracterización física del cemento tipo I-II. Fuente propia

Elemento	Unidad	Valor
Finura Blaine	(m <sup>2</sup> /kg)	400
Retenido #325	%	1.9
Fraguado Inicial (min)	Minutos	135
Fraguado Final (min)	Minutos	196
Resistencia 1 día	MPa	16.9
Resistencia 3 días	MPa	30.4
Resistencia 7 días	MPa	38.5
Resistencia 28 días	MPa	49.1

### 5.1.2 Agua

Para la elaboración del concreto se recomienda usar agua potable y que no tenga olor o sabor pronunciado, sin embargo, en ocasiones en el agua potable pueden encontrarse sales, cítricos y sulfatos disueltos que pueden afectar el comportamiento del concreto. Para ello la norma (NTC 3459, 2001) establece los requerimientos básicos del agua a usar en el diseño de mezclas de concreto, la cual está basada en la (EN-1008, 2007).

La Tabla 6-3 presenta los resultados de análisis físico-químico de una muestra del agua empleada en la elaboración de los diseños de mezcla. Los resultados muestran que están por debajo de los parámetros de control, corroborando que el agua usada es apta, de manera que no alterará las propiedades fisicoquímicas del concreto.

Tabla 6-3. Análisis físico químico del agua utilizada en las mezclas de concreto

Análisis realizado	Unidad	Resultado	Valor de referencia	Criterio
Bicarbonatos	mg CaCO <sub>3</sub> /L	< 5	Max 1000	Cumple
Carbonatos	mg CaCO <sub>3</sub> /L	105.60	Max 1000	Cumple
Cloruros	mg Cl-/L	108.50	Max 1000	Cumple
Sólidos totales	kg/L	0.0009	Max 0.05	Cumple
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> /L	283.42	Max 3000	Cumple

### 5.1.3 Arena

La arena usada en esta investigación se obtuvo de la misma fuente de uno de los agregados gruesos utilizados provenientes del departamento de Bolívar. Un análisis petrográfico siguiendo los lineamientos establecidos en (NTC 3773, 1995) permitió obtener la composición mineralógica de este material, y establecer su procedencia. Esta fuente está principalmente constituida por partículas de origen sedimentario (43.8 %), mono minerales (54.3 %), y una baja proporción de rocas ígneas (1.9 %), con una gran proporción de minerales silíceos potencialmente reactivos a los álcalis compuestos de cuarzo cristalino (18.2 %) y chert (24.2 %).

Adicionalmente se revisaron los lineamientos establecidos en la (NTC 174, 2018) para la arena arena. En la Figura 6-1 se muestran los resultados del análisis granulométrico a partir de los datos reportados en la Tabla 6-4 y en casi todos los casos la curva de gradación se encuentra dentro de los límites de la especificación. En la Tabla 5.5 se reportan el módulo de finura de 2.85 y % de material que pasa el tamiz 200 de 2.4.

Tabla 6-4. Análisis granulométrico de la arena (NTC 77). Fuente propia

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA	ESP. NTC 174	
in	mm		MIN. NTC 174	MAX. NTC 174
3/8"	9.5	100.0	100	100
No.4	4.75	96.0	95	100
No.8	2.36	76.0	80	100
No.16	1.18	63.0	50	85
No.30	0.6	51.0	25	60
No.50	0.3	25.0	10	30
No.100	0.15	4.0	2	10

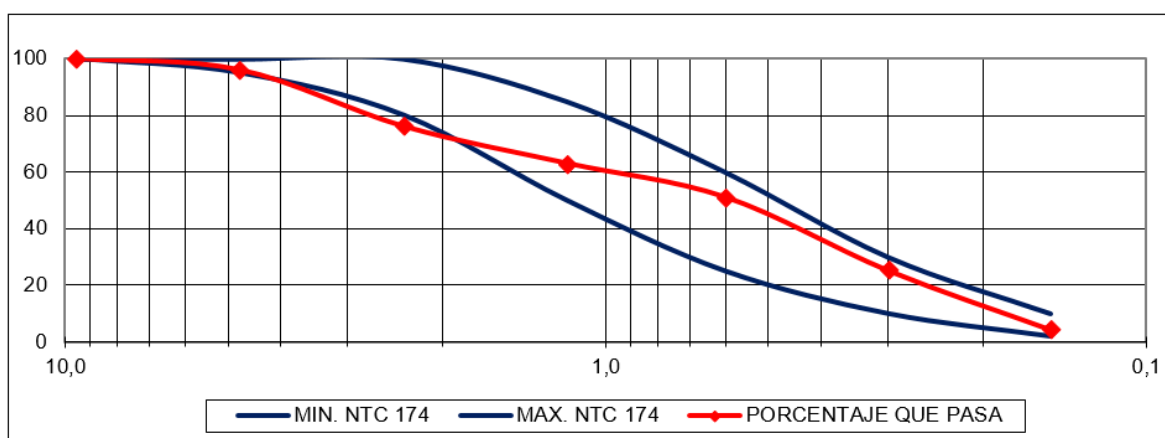


Figura 6-1. Análisis granulométrico de la arena (NTC 77) con los límites establecidos en (NTC174, 2018). Fuente propia.



En la Tabla 6-5 se presentan otras propiedades físicas del material como el contenido de materia orgánica, así como la densidad aparente y absorción que son parámetros importantes para el diseño de mezcla pues se usan en el cálculo del rendimiento volumétrico.

Tabla 6-5. Propiedades físicas de la arena respecto a los parámetros de control de las normas correspondientes. Fuente propia.

Ensayo	Resultado	Unidad
Pasa 200	2.4	%
Densidad Aparente	2,570	kg/m <sup>3</sup>
Densidad. SSS	2,598	kg/m <sup>3</sup>
Densidad Nominal	2,631	kg/m <sup>3</sup>
Absorción	1.30	%

#### **5.1.4 Agregado grueso**

Los agregados gruesos empleados en esta investigación corresponden a cinco fuentes de agregados de dos tamaños, cuya ubicación se presenta en la Figura 6-2. Para los concretos convencionales, se emplearon tres agregados de tamaño máximo nominal (TMN) 1" y dos con TMN  $\frac{3}{4}$ ", para los diseños de alta resistencia se usó agregado con TMN  $\frac{1}{2}$ ".

Dentro de la caracterización de un material es importante conocer su aspecto físico, ya que de este se pueden establecer comportamientos, como la textura, forma y apariencia, la Figura 6-3 presenta el registro fotográfico de cada uno de los materiales utilizados, generando contexto y siendo de herramienta para asociar sus propiedades a otras fuentes fuera de este análisis.

En esta sección se muestran algunos resultados del análisis petrográfico para cada uno de los agregados evaluados (NTC 3773, 1995), que servirán para el análisis del comportamiento de cada una de las mezclas en términos de las propiedades mecánicas evaluadas, además el análisis granulométrico, densidad y absorción.

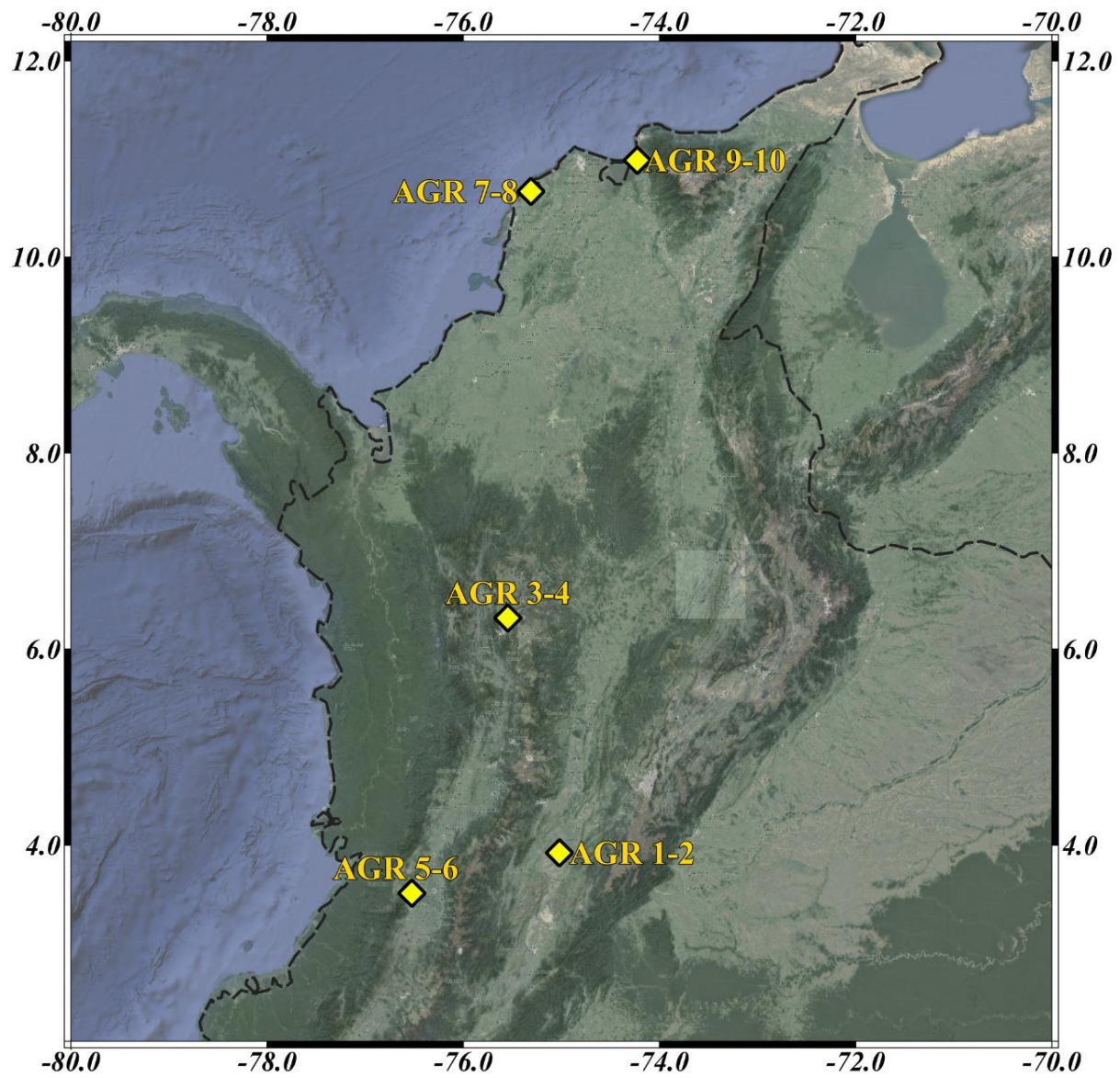


Figura 6-2. Ubicación de las canteras evaluadas. Fuente propia

Agregado 1



Agregado 3



Agregado 5



Agregado 7



Agregado 9



Figura 6-3. los cinco agregados usados para el montaje experimental. Fuente Propia

**Fuente 1 – Agregado 1 y 2**

Para los agregados gruesos 1 y 2 se encontró que corresponden a un depósito aluvial. y son principalmente partículas de origen ígneo (84.6%), sedimentario (7.4%), y un menor porcentaje de partículas de origen metamórfico (5.6%). Se presentan también una cantidad reducida de partículas monominerales (1.9%). Es importante resaltar la presencia de materiales de alta dureza, lo que lleva a que la respuesta mecánica de la roca sea elevada con alta resistencia mecánica y alta rigidez.

En la Figura 6-4 se muestran los resultados del análisis granulométrico o curva de gradación para el agregado grueso (Fuente 1) indicando el cumplimiento de los límites establecidos en (NTC174, 2018).

La porosidad encontrada en el agregado es baja según lo reportado en el análisis petrográfico y consistente con el valor de absorción como se reporta en la Tabla 5-6. En la Tabla 6-5 se presentan otras propiedades físicas del material como el porcentaje que pasa tamiz 200, así como la densidad aparente y absorción que son parámetros importantes para el diseño de mezcla.

Tabla 6-6. Propiedades físicas de la grava 1 TMN 1", respecto a los parámetros de control de las normas correspondientes. Fuente propia.

Ensayo	Resultado	Unidad
Pasa 200	0.9	%
Densidad Aparente	2,685	kg/m <sup>3</sup>
Densidad. SSS	2,701	kg/m <sup>3</sup>
Densidad Nominal	2,727	kg/m <sup>3</sup>
Absorción	0.60	%

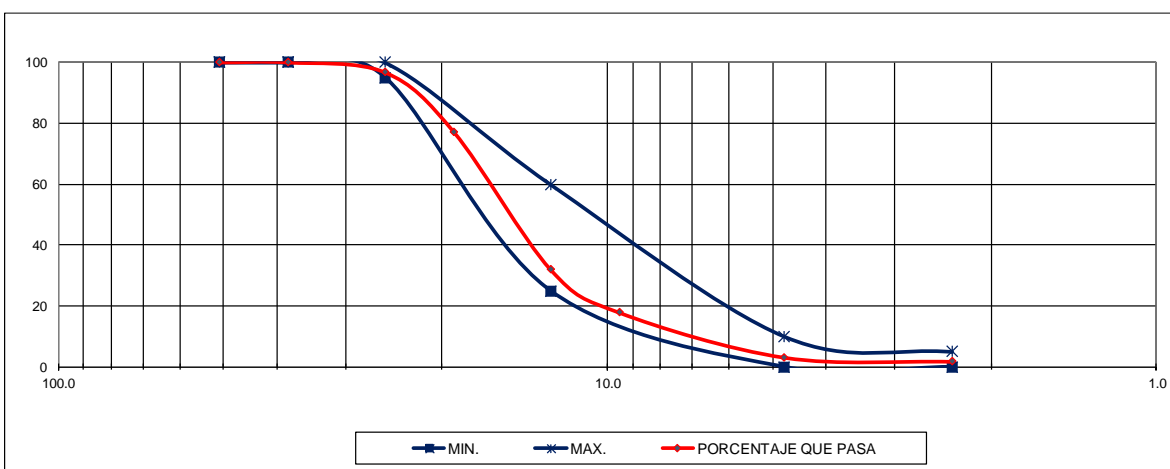


Figura 6-4. Análisis granulométrico grava 1 TMN 1" (NTC 77), respecto a los límites planteados en la (NTC174, 2018). Fuente propia.

### Fuente 2 – Agregado 3 y 4

Para los agregados gruesos 3 y 4 se encontró que corresponden a un depósito de explotación minera de cantera, que en su mayoría (77%) son partículas de origen ígneo, y él es 23% del total de la muestra son partículas monominerales.

La muestra presenta una gran proporción de cuarzos (10.5%) en general de dureza alta, la porosidad reportada en el análisis petrográfico es muy baja y consistente con el valor de absorción como se reporta en la se presentan otras propiedades físicas del material como el porcentaje que pasa tamiz 200, así como la densidad aparente y absorción que son parámetros importantes para el diseño de mezcla Tabla 6-7. La curva de gradación se muestra en la Figura 5-6, indicando el cumplimiento de los límites establecidos en la norma (NTC174, 2018).

Tabla 6-7. Propiedades físicas de la grava 3 TMN 1", respecto a los parámetros de control de las normas correspondientes. Fuente propia.

Ensayo	Resultado	Unidad
Pasa 200	0.2	%
Densidad Aparente	2,685	kg/m <sup>3</sup>
Densidad. SSS	2,752	kg/m <sup>3</sup>
Densidad Nominal	2,797	kg/m <sup>3</sup>
Absorción	0.60	%

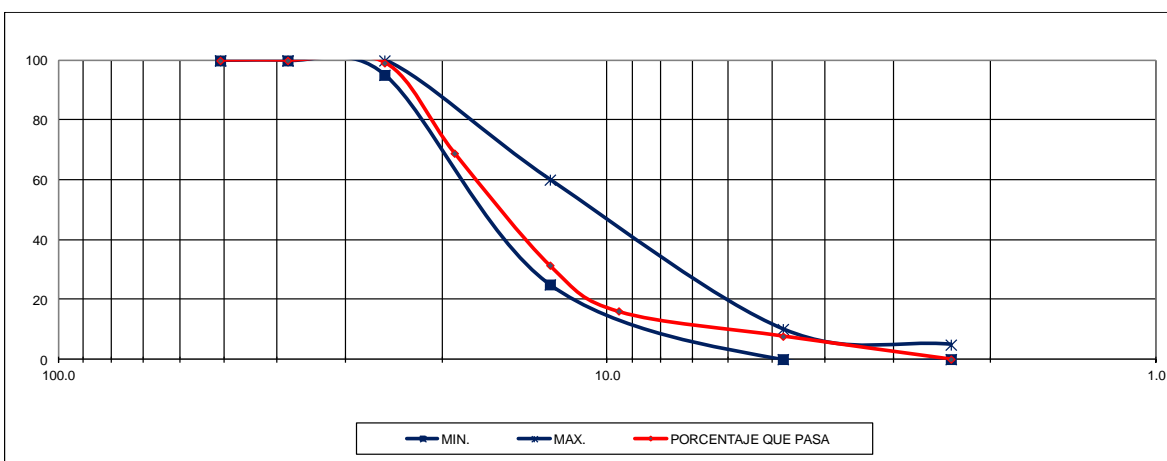


Figura 6-5. Análisis granulométrico grava 3 TMN 1" (NTC 77), respecto a los límites planteados en la (NTC174, 2018). Fuente propia.

### Fuente 3 – Agregado 5 y 6

Los agregados 5 y 6 corresponden a gravas obtenidas mediante procesos de arranque y trituración. Su origen corresponde en su totalidad a un depósito de rocas de extracción en cantera.

Las partículas analizadas tienen origen ígneo en su totalidad y se encuentra una muy baja proporción de partículas monominerales. Se encuentra entonces que el 81.2% de las partículas corresponde a Basaltos de tonalidad gris oscura, en general de superficie rugosa. Se encuentra también que dentro de las partículas ígneas se encuentra doleritas y cuarzos. Es importante resaltar la presencia de la muestra analizada de materiales de dureza media.

La porosidad reportada en el análisis petrográfico es baja y consistente con el valor de absorción reportado en la Tabla 6-8, donde se presentan otras propiedades físicas del material como el porcentaje que pasa tamiz 200, así como la densidad aparente y absorción que son parámetros importantes para el diseño de mezcla. La curva de gradación se muestra en la Figura 6-6, indicando el cumplimiento de los límites establecidos en la norma (NTC174, 2018)

Tabla 6-8. Propiedades físicas de la grava 5 TMN 1", respecto a los parámetros de control de las normas correspondientes. Fuente propia.

Ensayo	Resultado	Unidad
Pasa 200	0.7	%
Densidad Aparente	2,823	kg/m <sup>3</sup>
Densidad. SSS	2,855	kg/m <sup>3</sup>
Densidad Nominal	2,914	kg/m <sup>3</sup>
Absorción	1.40	%

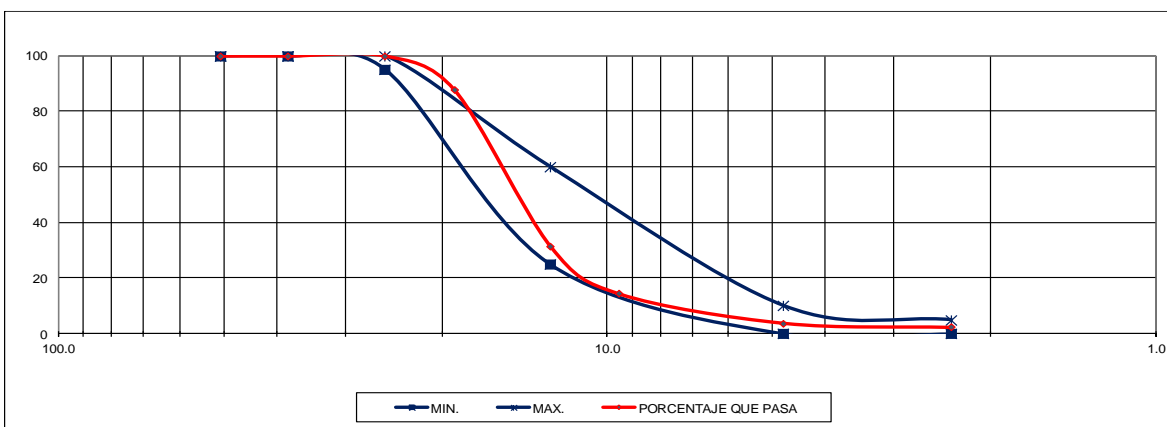


Figura 6-6. Análisis granulométrico grava 5 TMN 1" (NTC 77), respecto a los límites planteados en la (NTC174, 2018). Fuente propia.

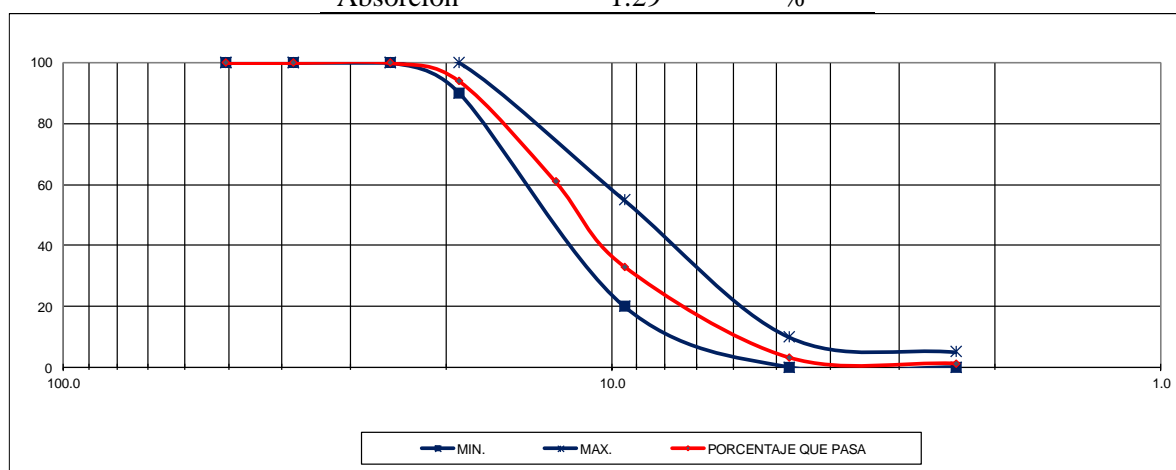
### Fuente 4 – Agregado 7 y 8



Las partículas analizadas tienen origen ígneo y sedimentario, no se evidencia presencia de partículas metamórficas, se presentan también una cantidad importante de partículas monominerales. La dureza evidenciada en las partículas es elevada, lo que lleva a que la respuesta mecánica de la roca sea elevada, con alta resistencia mecánica y alta rigidez. Es importante considerar que las formas redondeadas y la alta esfericidad, junto con la superficie baja en rugosidad puede reducir la calidad de la transferencia mecánica en la ITZ, comprometiendo la resistencia de la mezcla.

Tabla 6-9. Propiedades físicas de la grava 8 TMN 3/4", respecto a los parámetros de control de las normas correspondientes. Fuente propia.

Ensayo	Resultado	Unidad
Pasa 200	0.6	%
Densidad Aparente	2,669	kg/m <sup>3</sup>
Densidad. SSS	2,699	kg/m <sup>3</sup>
Densidad Nominal	2,749	kg/m <sup>3</sup>
Absorción	1.29	%



### Fuente 5 – Agregado 9 y 10



Los agregados gruesos 9 y 10 corresponden a gravas obtenidas mediante procesos de arranque y trituración. Su origen corresponde en su totalidad a un depósito de cantera.

Las partículas analizadas tienen origen metamórfico en su totalidad, no se evidencia presencia de partículas ígneas, ni sedimentarias. Es importante resaltar la presencia de la muestra analizada de materiales de alta dureza, lo que lleva a que la respuesta mecánica de la roca sea elevada, con alta resistencia mecánica y alta rigidez. La meteorización se caracteriza por presencia de manchas en los agregados y en algunos casos presencia de bordes alterados. El 1.2% de las partículas corresponde a meteorización alta, el 2.3% de las partículas presentan meteorización moderada, y el 5.7% meteorización con pequeñas manchas.

La porosidad encontrada en el agregado es baja, consistente con el valor de absorción reportado en la Tabla 6-10, en la que se presentan otras propiedades del material como el porcentaje que pasa tamiz 200, así como la densidad aparente y absorción que son parámetros importantes para el diseño de mezcla. La curva de gradación se muestra en la Figura 6-7, indicando el cumplimiento de los límites establecidos en la norma (NTC174, 2018).

Tabla 6-10. Propiedades físicas de la grava 9 TMN 3/4", respecto a los parámetros de control de las normas correspondientes. Fuente propia.

Ensayo	Resultado	Unidad
Pasa 200	1.0	%
Densidad Aparente	2,675	kg/m <sup>3</sup>
Densidad. SSS	2,703	kg/m <sup>3</sup>
Densidad Nominal	2,758	kg/m <sup>3</sup>
Absorción	1.16	%

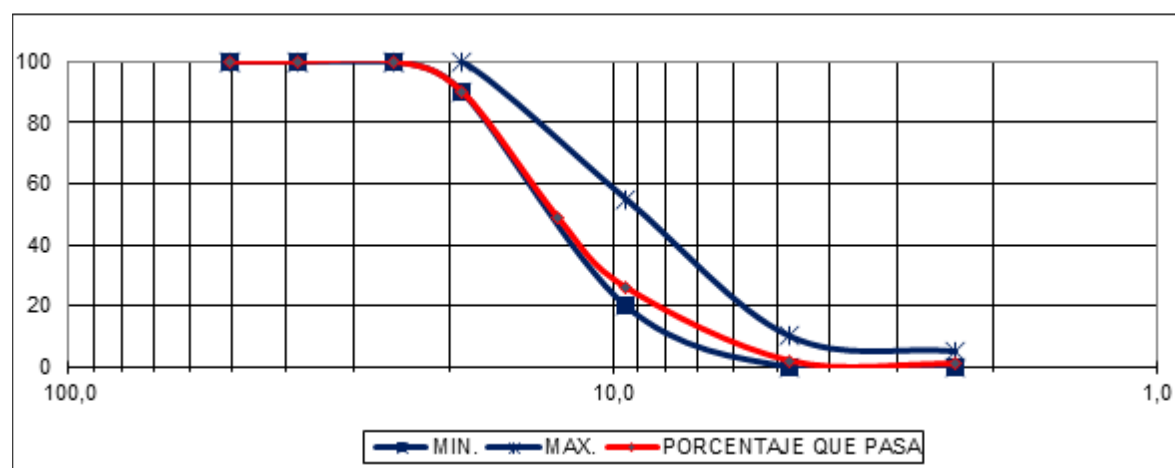


Figura 6-8. Análisis granulométrico grava 9 TMN 3/4" (NTC 77), respecto a los límites planteados en la (NTC174, 2018). Fuente propia.

### 5.1.5 Aditivos

Para el desarrollo de esta investigación se usaron dos aditivos, un retardante y un superplastificante y que son comúnmente empleados en la industria del concreto. El primero con el objetivo de garantizar el tiempo requerido para el transporte desde las plantas productoras hasta las obras y el segundo como un reductor de agua capaz de aumentar la plasticidad del concreto, permitiendo usar menores cantidades de agua por metro cubico, permitiendo que la mezcla sea más eficiente al reducir las cuantías de cemento.

### 5.1.6 Retardante

Es un aditivo líquido, de gran poder retardante sobre el tiempo de fraguado del concreto y reductor de agua. Este es producido por SIKA Colombia cumpliendo con los requisitos establecidos en la NTC 1299. La Tabla 6-11 presenta información técnica de este.

Tabla 6-11. Información técnica aditivo superplastificante AD 95. Fuente SIKA Colombia

Propiedad	Especificación
Estado Físico	Líquido ligeramente viscoso
Color	Café
PH	5 +- 1.5
Densidad	1.10 +- 0.003 g/cm <sup>3</sup>
Solubilidad	Soluble en agua 20°C

### 5.1.7 Superplastificante

Es un aditivo líquido, reductor de agua de ultra alto rango y superplastificante basado en poli carboxilatos. Sin la presencia de cloruros. Este es producido por SIKA Colombia cumpliendo con los requisitos establecidos en la NTC 1299. La Tabla 6-12 presenta información técnica de este.

Tabla 6-12. Información técnica aditivo superplastificante Visco Flow 8400. Fuente SIKA Colombia

Propiedad	Especificación
Estado Físico	Líquido
Color	Café
PH	9 +- 1
Densidad	1.20 +- 0.003 g/cm <sup>3</sup>
Solubilidad	Soluble en agua 20°C

## Capítulo 7. Programa experimental

---

Este trabajo de investigación se realizó con materiales provenientes de 5 fuentes de agregados, de las ciudades principales en Colombia (Bogotá, Medellín, Cali, Cartagena, Barranquilla y Santa Marta), los cuales son usados en una concretera con participaciones de mercado históricamente superiores al 40% (ARGOS, 2018). Razón por la que es probable que gran cantidad de las edificaciones del país cuenten con concretos con este tipo de agregados. La propuesta de esta investigación contempla la elaboración de mezclas de concreto con cada agregado y empleando una única arena, de manera que se pueda establecer la influencia de cada uno de los agregados gruesos en los distintos parámetros evaluados.

De cada fuente de agregado se emplearon dos TMN (tamaño máximo nominal), uno para los concretos con resistencias convencionales ( $1'' - \frac{3}{4}''$  TMN) y el otro para los concretos de alta resistencia ( $\frac{1}{2}''$  TMN). Con el propósito de estudiar concretos con resistencias representativas de la demanda del concreto en la región, diferentes relaciones agua/cementante (a/cm) fueron implementadas en el programa de elaboración de mezclas de concreto. Una serie de mezclas se fabricaron con relación a/cm de: 0,6, 0,55, y 0,49 para resistencias entre los 20 MPa a los 50 MPa a diferentes edades de curado y se consideran de aquí en adelante como representativas de un concreto convencional. Para el caso de la de los concretos de alta resistencia se tomó una relación a/cm igual a 0,35, que incluye resistencias entre los 55 a 93 MPa a diferentes edades de curado.

De los agregados disponibles y las diferentes relaciones a/cm consideradas en esta investigación, el programa experimental consta de un total de 20 del grupo de convencionales y de alta resistencia como se muestra en la Tabla 7-1, donde para cada fuente de agregados se especifica el TMN de agregado con que se realizará cada diseño de mezcla, y para las diferentes relaciones a/cm. La Tabla 7-2 presenta el número total de especímenes que se tomaron para cada uno de los diseños de mezcla, a las diferentes edades (3, 7, 28, y 56); siendo un total de 16 cilindros por cada uno, repartidos entre: resistencia, módulo elástico, tracción indirecta, peso, ultrasonido y resistividad. Algunos ensayos son destructivos de manera que requieren de muestras solo para la ejecución de estos, en cambio, hay ensayos que se realizaron previo a estos.

Tabla 7-1. Diseños por relación Agua/Cemento por fuente y tamaño de agregado.

Cantera	Grupo diseño	Ciudad	ID	A/C					N°
				TMN	0.6	0.55	0.49	0.35	
				F'c	21	28	34	8000	
1	Convencional	Bogotá	1	1"	x	x	x		3
	Alta	Bogotá	2	1/2"				x	1
2	Convencional	Medellín	3	1"	x	x	x		3
	Alta	Medellín	4	1/2"				x	1
3	Convencional	Cali	5	1"	x	x	x		3
	Alta	Cali	6	1/2"				x	1
4	Convencional	Barranquilla	7	3/4"	x	x	x		3
	Alta	Barranquilla	8	1/2"				x	1
5	Convencional	Santa Marta	9	3/4"	x	x	x		3
	Alta	Santa Marta	10	1/2"				x	1

De los 20 diseños propuestos, se separaron en dos grupos; los de relación Agua/Cementante: 0,6 – 0,55 – 0,49, se denominaron como concretos de resistencias convencionales y los realizados con concretos Agua/Cementante: 0,35, se llamaron como concretos de alta resistencia. Los diseños especiales se realizaron con el agregado de la cantera 4 en la relación a/c: 0.55.

Tabla 7-2. Numero de cilindros por cada muestra y cantidad de ensayos por parámetro

Ensayo/número de muestras	Edad				Total - Ensayos muestra
	3	7	28	56	
Resistencia (MPa) **	2	4	4	4	14
Módulo elástico (MPa)*		4	4	3	10
Tracción indirecta (MPa)*			2		2
Peso (kg)	2	4	6	3	14
Ultrasonido	2	4	6	3	14
Resistividad	2	4	6	3	14

\*Estos ensayos requieren de una muestra para cada medición.

\*\*El resultado de este parámetro se puede obtener de otro ensayo, en caso de no realizarse el otro ensayo, requiere de una muestra para cada medición.

## 7.1 Fase 1 Diseño de mezclas

### 6.1.1 Criterios de diseño

Para definir las cantidades requeridas de cada uno de los materiales para los diseños de mezcla a evaluar, se siguió las especificaciones de la norma (ACI 211-1, 1991), teniendo en cuenta que las cantidades dependerán de cada una de las fuentes de agregados, con densidad, absorción y demás parámetros físicos diferentes que modificarán las proporciones de las mezclas en la fase de producto en proceso..

Se empezó por hacer el ensamble granulométrico para cada fuente de agregado para los dos tamaños máximos nominales seleccionados, dado que cada fuente posee variaciones en la gradación, producto de la matriz, proceso de trituración y condiciones locales de la cantera.

Los siguientes parámetros se emplearon en el diseño de mezclas de concreto:

- a) Se mantuvo la relación agregado fino-agregado grueso constante para todos los diseños, con cantidades de grava muy similares entre diseño, de manera que las cantidades de agregado grueso entre las diferentes mezclas no afectara los resultados.
- b) Todos los diseños para los concretos convencionales fueron desarrollados para obtener un asentamiento de  $7'' \pm 1''$  que corresponde con el rango empleado en los productos de mayor venta en el mercado. Para lograr este asentamiento inicial, fue necesario ajustar cantidades de agua en las mezclas que varían entre los  $180 \pm 4$  L de agua y dosis de superplastificante entre  $0.50\% \pm 0.1\%$ . La mezcla de concreto que no cumpliera este criterio fue ajustada en repetidas ocasiones hasta estar dentro del rango establecido.
- c) Para los concretos de alta resistencia el asentamiento seleccionado corresponde a  $9'' \pm 1''$ . Esto se debe a que estos concretos en la mayoría de los casos requieren ser dispuestos en elementos con mayor densidad de acero de refuerzo, dificultando un poco su colocación. En esta investigación se usaron agregados de  $\frac{1}{2}''$  TMN; esta reducción en el tamaño de agregado genera mayor área superficial, aumentando el requerimiento de agua para lograr la manejabilidad de diseño. En este caso el agua de diseño se ajustó entre  $190 \pm 6$  l, con dosis de superplastificante en el rango de  $0.80\% \pm 0.05\%$  para lograr el asentamiento requerido.

Dado que en esta investigación se desea evaluar concretos representando las condiciones típicas encontradas en la industria del concreto, fue necesario evaluar los parámetros de control en el proceso de fabricación de las diferentes mezclas tales como: asentamiento inicial, asentamiento a una hora, rendimiento volumétrico y contenido aire; de manera que sean mezclas de concreto representativas al producto final con el que se construyen típicamente las edificaciones en cada ciudad para cada uno de los agregado seleccionados para el estudio.

## 6.1.2 Ensamble granulométrico

### 7.1.2.1 Ensamble granulométrico para concretos convencionales

Esta investigación contempla el uso de una arena y 5 agregados gruesos que cumplen los lineamientos establecidos en (NTC 174, 2018). De estos materiales, tres agregados tienen TMN 1" y dos con TMN  $\frac{3}{4}$ ", y una arena con TMN N°4. La Tabla 7-3 presenta los resultados del ensayo de gradación para cada material usado en las 15 mezclas propuestas de concretos convencionales, la información mostrada corresponde al porcentaje de agregado que pasa por cada tamiz con las que se realizó el ensamble granulométrico empleando cada tipo de agregado grueso y la arena de referencia usada; buscando siempre estar dentro de los parámetros propuestos por (Fuller, W. B., & Thompson, 1907) en la Tabla 7-4 garantizando una adecuada compacidad de la mezcla permitiendo la correcta colocación del concreto.

Tabla 7-3. Porcentaje que pasa por cada tamiza para los 5 agregados usados en concretos convencionales

Tamiz		% que pasa por tipo de agregado					
mm	Pulgadas	Arena	N° 1	N° 3	N° 5	N° 8	N° 9
76.1	3"	100%	100%	100%	100%	100%	100%
50.8	2"	100%	100%	100%	100%	100%	100%
30.1	1 1/2"	100%	100%	100%	100%	100%	100%
25.4	1"	100%	97%	99%	100%	100%	100%
19.1	3/4"	100%	77%	69%	88%	94%	90%
12.7	1/2"	100%	32%	31%	32%	61%	49%
9.51	3/8"	100%	18%	16%	14%	33%	26%
4.76	No 4	96%	3%	8%	4%	3%	2%
2.38	No 8	76%	2%	0%	2%	1%	1%
1.19	No 16	63%	0%	0%	0%	0%	0%
0.595	No 30	51%	0%	0%	0%	0%	0%
0.297	No 50	25%	0%	0%	0%	0%	0%
0.149	No 100	4%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabla 7-4. Ensamble granulométrico para los 5 agregados gruesos con la arena de referencia, respecto a los límites de propuestos Fuller and Thompson para  $\frac{3}{4}$ " – 1".

Tamiz		Ensamble granulométrico					Límites			
mm	Pulgadas	N° 1	N° 3	N° 5	N° 7	N° 9	máx3/4	mín3/4	máx1	mín1
76.1	3"	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
50.8	2"	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
30.1	1 1/2"	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
25.4	1"	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%	100%
19.1	3/4"	89%	85%	94%	97%	95%	100%	100%	85%	90%
12.7	1/2"	66%	66%	66%	81%	75%	87%	80%	68%	78%
9.51	3/8"	59%	58%	57%	67%	63%	79%	68%	58%	71%
4.76	No 4	50%	52%	50%	50%	49%	62%	47%	40%	56%
2.38	No 8	39%	38%	39%	39%	39%	48%	32%	27%	44%
1.19	No 16	32%	32%	32%	32%	32%	38%	22%	19%	34%
0.595	No 30	26%	26%	26%	26%	26%	30%	15%	13%	27%
0.297	No 50	13%	13%	13%	13%	13%	23%	10%	9%	21%
0.149	No 100	2%	2%	2%	2%	2%	18%	7%	0%	10%
Grava/Agregado		50%	50%	50%	50%	50%				

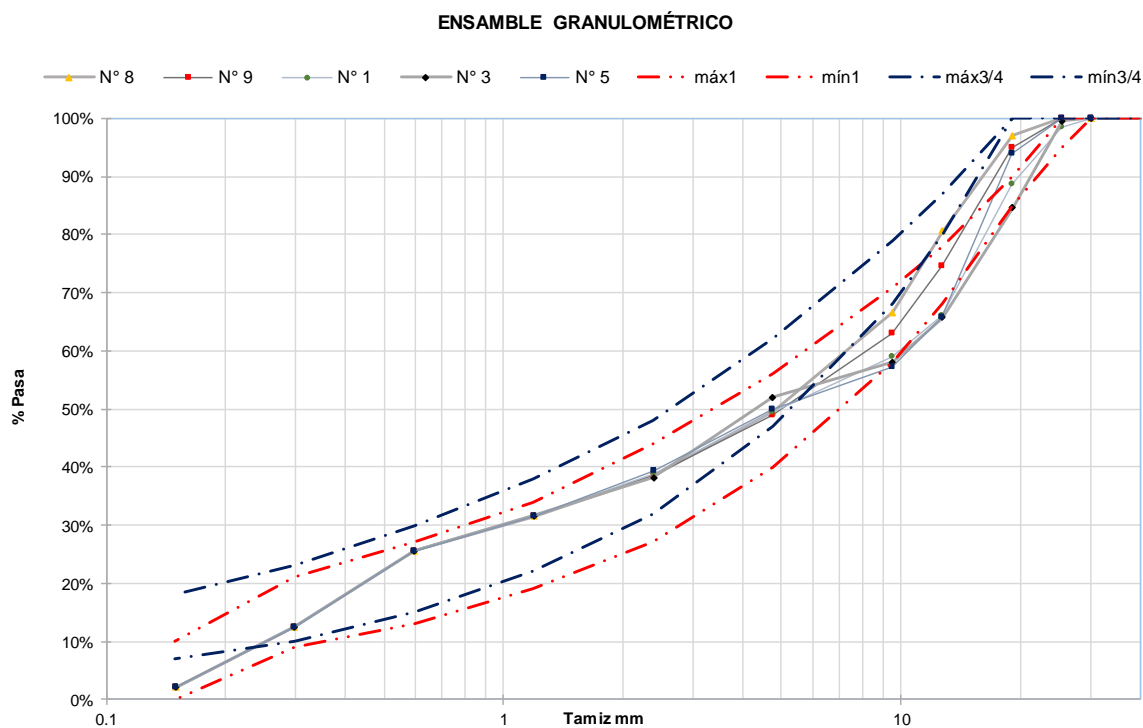


Figura 7-1 Ensamble granulométrico de los 5 agregados gruesos con la arena de referencia, respecto a los límites de propuestos Fuller and Thompson para  $\frac{3}{4}$ " – 1".

La Figura 7-1 presenta los resultados del ensamble granulométrico con buen comportamiento de los distintos materiales, en el que se pretende que la gradación conjunta de los agregados quedara dentro del límite superior de  $\frac{3}{4}$ " y el inferior de 1", pudiendo trabajarlos como uno solo y siendo comparables. La relación grava-agregado es el criterio que toma como 0.50 y de esta manera se determina el ensamble de cada fuente de material. Como el objetivo principal de la investigación es evaluar la influencia del agregado grueso, se evitan las mezclas con grandes cantidades de fino, de manera que la grava fuese la que dominara el comportamiento mecánico.

#### 7.1.2.2 Ensamble granulométrico para concretos de alta resistencia

Para estas mezclas se contempla el uso de una arena con TMN N°4 y 5 agregados gruesos con un TMN de  $\frac{1}{2}$ " que cumplen con la (NTC174, 2018). La *Tabla 7-5* presenta los resultados de las gradaciones de cada material a ser usado en las 5 mezclas propuestas para los concretos de alta resistencia, la información mostrada corresponde al porcentaje de agregado que pasa por cada tamiz con las que se realizó el ensamble granulométrico de cada tipo de agregado grueso, y empleando una arena de referencia, buscando siempre estar dentro de los parámetros propuestos por que se presentan en la *Tabla 7-6* que permiten un adecuado comportamiento y colocación del concreto (Fuller, W. B., & Thompson, 1907). La Figura 7-2 presenta el resultado del ensamble granulométrico para los cinco agregados usados en el montaje experimental; donde la variable relación grava/agregado se tomó como 0.55. Como objetivo principal de la investigación es evaluar la influencia del agregado grueso, se evitan las mezclas con grandes cantidades de fino, de manera que la grava fuese la que dominara el comportamiento mecánico, para este caso se aumenta la proporción de grava en 5 puntos porcentuales con respecto a la empleada para los concretos convencionales. Este valor permite tener un buen comportamiento de la mezcla en términos de trabajabilidad y una cantidad relativamente cercana de agregados gruesos para todas las mezclas, manteniendo las diferentes relaciones agua cemento del diseño. Dado que los diseños especiales se realizaron con el agregado N° 8, se tomó el mismo ensamble granulométrico de este material planteado en el grupo de los convencionales, dado que las modificaciones y condiciones propuestas no alteran la gradación de los materiales.



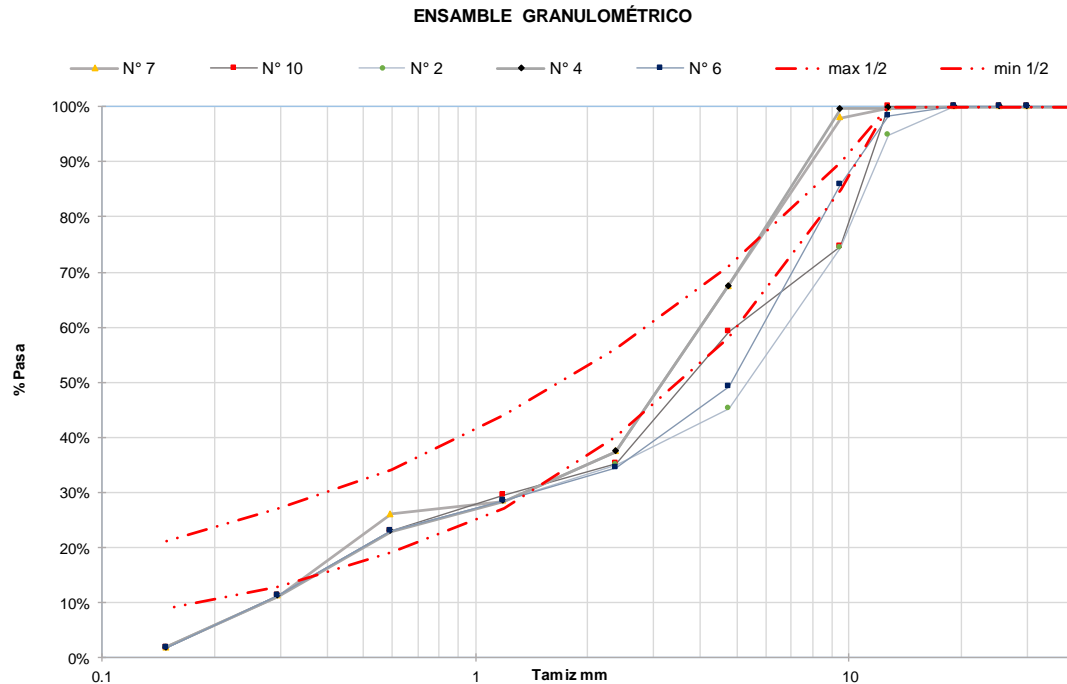


Figura 7-2 Ensamble granulométrico de los 5 agregados gruesos con la arena de referencia, respecto a los límites de propuestos Fuller and Thompson para 1/2".

Tabla 7-5. Porcentaje que pasa por cada tamiza para los 5 agregados usados en concretos de alta resistencia

Tamiz		% que pasa por tipo de agregado					
mm	Pulgadas	Arena	N° 2	N° 4	N° 6	N° 8	N° 10
76.1	3"	100%	100%	100%	100%	100%	100%
50.8	2"	100%	100%	100%	100%	100%	100%
30.1	1 1/2"	100%	100%	100%	100%	100%	100%
25.4	1"	100%	100%	100%	100%	100%	100%
19.1	3/4"	100%	100%	100%	100%	100%	100%
12.7	1/2"	100%	91%	100%	97%	100%	100%
9.51	3/8"	100%	53%	99%	74%	96%	54%
4.76	No 4	96%	3%	44%	11%	44%	29%
2.38	No 8	76%	1%	6%	1%	6%	2%
1.19	No 16	63%	0%	0%	0%	0%	2%
0.595	No 30	51%	0%	0%	0%	6%	0%
0.297	No 50	25%	0%	0%	0%	0%	0%
0.149	No 100	4%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabla 7-6. Ensamble granulométrico para los 5 agregados gruesos con la arena de referencia, respecto a los límites de propuestos Fuller and Thompsom para ½"

Tamiz		Ensamble granulométrico					Límites para del ensamble			
mm	Pulgadas	N° 2	N° 4	N° 6	N° 7	N° 10	máx3/4	mín3/4	máx1	mín1
76.1	3"	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
50.8	2"	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
30.1	1 1/2"	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
25.4	1"	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%	100%
19.1	3/4"	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	85%	90%
12.7	1/2"	95%	100%	98%	100%	100%	87%	80%	68%	78%
9.51	3/8"	74%	100%	86%	98%	75%	79%	68%	58%	71%
4.76	No 4	45%	68%	49%	68%	59%	62%	47%	40%	56%
2.38	No 8	35%	37%	34%	37%	35%	48%	32%	27%	44%
1.19	No 16	28%	28%	28%	28%	29%	38%	22%	19%	34%
0.595	No 30	23%	23%	23%	26%	23%	30%	15%	13%	27%
0.297	No 50	11%	11%	11%	11%	11%	23%	10%	9%	21%
0.149	No 100	2%	2%	2%	2%	2%	18%	7%	0%	10%
% Grava/Agregado		55%	55%	55%	55%	55%				

### 6.1.3 Diseños de mezcla por tipo de agregado

Una vez, caracterizados los materiales y definidos los criterios de diseño, como: propiedades físicas de los agregados, relaciones: agua/cemento, cantidades de agua, relación grava/agregado y dosis de aditivo. Se realizaron los 15 diseños para los concretos convencionales, los 5 para diseños de alta resistencia y 4 diseños con adición de Microsílice al 7%, fibra de celulosa y modificando el porcentaje de caras fracturadas del agregado número 8, del cual ya se conoce su comportamiento.

En la Tabla 6-7 se indican las cantidades de cada uno de los materiales empleados en el diseño de mezcla de cada uno de los concretos convencionales, con relaciones agua/cemento de 0.60, 0.55 y 0.49, cantidades de cemento entre 293 – 375 kg, la cantidad de agua se estableció en  $180 \pm 4$  L, el retardante se mantuvo igual para todos los diseños en 0.32% y el superplastificante en  $0.50\% \pm 0.1\%$ . Dada la relación grava/agregado de: 0.50%, que se estableció para los diseños de relación agua/cemento de 0.60, se calculó la relación fino/agregado; que es la suma de la arena y el cemento entre respecto a todo el volumen, manteniendo la cantidad de grava por diseño lo más cercano entre los distintos agregados, teniendo cantidades equivalente, permitiendo comprar los diseños sin que el volumen de la grava fuese una variable que no permitiera comparar los resultados entre los distintos diseños.

Tabla 7-7. Diseños de mezcla para concretos convencionales, por fuente de agregado en diferentes relaciones Agua/Cemento.

Agregado	A/C	Cemento	Arena	Grava	Agua	Retardante	Super Plastificante	AR/GR	F/GR
C-BOG-1	0.60	300	946	928	180	0.32	0.5	0.505	0.57
C-BOG-1	0.55	327	921	930	180	0.32	0.55	0.498	0.57
C-BOG-1	0.49	367	886	933	180	0.32	0.55	0.487	0.57
C-MED-3	0.60	300	946	928	180	0.32	0.5	0.505	0.57
C-MED-3	0.55	327	921	930	180	0.32	0.48	0.498	0.57
C-MED-3	0.49	367	886	933	180	0.32	0.55	0.487	0.57
C-CAL-5	0.60	293	986	953	176	0.32	0.45	0.508	0.57
C-CAL-5	0.55	330	940	953	176	0.32	0.42	0.497	0.57
C-CAL-5	0.49	360	925	957	176	0.32	0.42	0.491	0.57
C-BAQ-7	0.60	306	931	922	184	0.32	0.6	0.503	0.57
C-BAQ-7	0.55	334	906	924	184	0.32	0.58	0.495	0.57
C-BAQ-7	0.49	375	869	927	184	0.32	0.58	0.484	0.57
C-SMR-9	0.60	315	916	918	189	0.32	0.6	0.5	0.57
C-SMR-9	0.55	343	891	920	189	0.32	0.58	0.492	0.57
C-SMR-9	0.49	385	854	923	189	0.32	0.58	0.482	0.57

En la Tabla 6-8 se indican las cantidades de cada uno de los materiales empleados en el diseño de mezcla de los concretos de alta resistencia, empleando una relación agua/cemento de 0.35, con cantidades de cemento entre 525 – 560 kg, la cantidad de agua se estableció en  $190 \pm 61$ , se mantuvo el retardante igual para todos los diseños en 0.32% y el superplastificante en  $0.80\% \pm 0.05\%$ . En el capítulo anterior se había definido una relación grava/agregado de: 0.55%, de la cual se tomó la relación fino/agregado; que es la suma de la arena y el cemento respecto a todos los materiales, de manera que se mantuviera la cantidad de grava por diseño lo más cercano entre los distintos agregados y la proporción de estos en cada mezcla sea equivalente, permitiendo comprar los diseños sin que este parámetro sea una variable que desvíe los resultados.

Tabla 7-8. Diseños de mezcla para concretos de alta resistencia, por fuente de agregado en diferentes relaciones Agua/Cemento.

Agregado	A/C	Cemento	Arena	Grava	Agua	Retardante	Super Plastificante	AR/GR	F/GR
A-BOG-2	0.35	542	736	888	190	0.32	0.85	0.453	0.59
A-MED-4	0.35	548	733	890	192	0.32	0.80	0.452	0.59
C-CAL-6	0.35	525	792	915	184	0.32	0.80	0.464	0.59
C-BAQ-8	0.35	548	709	874	192	0.32	0.75	0.448	0.59
C-SMR-10	0.35	560	722	890	196	0.32	0.75	0.448	0.59

En los 20 diseños ya propuestos, se considera la influencia de la fuente de cada agregado y variando la relación agua/cemento se genera un espectro de resistencias para análisis. Sin embargo, en la práctica la formulación de mezclas de concreto no solo se limita a evaluar propiedades relacionadas con el comportamiento a compresión, sino mejorar características adicionales como durabilidad, resistencia a tracción entre otras, empleando por ejemplo adiciones en las mezclas de concreto. En la Tabla 7-9, se presentan tres diseños adicionales considerados en esta investigación empleando sílice, fibra de celulosa y agregados con porcentajes de caras fracturadas entre 80% y 84% y ver cómo estas variables impactan las propiedades físicas y mecánicas evaluadas en esta investigación.

Tabla 7-9. Diseños de mezcla para concretos convencionales, para el agregado N°8, con relación Agua/Cemento: 0.55 y características especiales.

Diseño	A/Cte	Cemento	Especial	Retardante	Super Plastificante	AR/GR	F/GR
E-BAG-RF	0.55	334	Referencia	0.32	0.58	0.495	0.57
E-BAG-7S	0.55	311	Sílice 7%	0.32	0.58	0.495	0.57
E-BAG-FC	0.55	334	Fibra Celulosa	0.32	0.58	0.495	0.57
E-BAG-MC	0.55	334	CF: 27%	0.32	0.58	0.495	0.57

Para ello se propuso una mezcla de control E-BAG-RF, como referencia para evidenciar la influencia de las variables modificadas, el agregado escogido fue el N°8 ya que es un agregado local y cuya disponibilidad permitió para realizar el montaje experimental. La mezcla E-BAG-FC, posee un remplazo del cementante en 7% de sílice, quedando 311 kg de cemento y 23 kg de adición, esta alternativa es usada cuando se quiere mejorar las propiedades de durabilidad del concreto, densificando la matriz y reforzando la ITZ; de manera que fortalece la zona de interacción entre la pasta y los agregados, reduciendo la permeabilidad, alargando la vida útil de los elementos expuestos a condiciones exigentes. La mezcla E-BAG-7S, posee una adición de fibra de celulosa de 1.5 libras por  $m^3$  de concreto, en la que se mejora el curado interno del concreto, aumentando propiedades mecánicas como la capacidad a flexión, a compresión y reduciendo en un 85% la probabilidad de la ocurrencia de fisuras por contracción plástica, aumentando la durabilidad de los elementos. La mezcla E-BAG-MC, posee una modificación en la forma del agregado, este agregado en su condición natural posee un porcentaje de dos caras fracturadas entre 80% y 84%, este parámetro influye mucho en la manera en que interactúa la matriz del concreto con los agregados, generando superficies más lisas capaces impactar las propiedades mecánicas del concreto, la cual es la hipótesis por evaluar.

## 7.2 Fase 2 Montaje de diseños

### 6.2.1 Preparación de los materiales

La toma de muestra de agregados se realizó siguiendo el procedimiento planteado en la práctica para la toma de muestras de agregados (NTC129, 2019), en este caso, el material fue tomado en las pilas de agregado de las plantas de concreto de las distintas ciudades donde se utiliza cada uno. En cada pila se realizó una homogenización con la ayuda de cargadores, de manera que se pudiera tomar una muestra representativa, evitando la segregación del material, dada la cantidad necesaria de materiales para el montaje experimental se cumple con los mínimos exigidos en la norma, presentados en la Tabla 7-10.

Tabla 7-10. Tamaño de muestras de agregados para muestreo. Tomado de: NTC 129

Tamaño máximo nominal de agregados TMN (mm)	Masa mínima aproximada de las muestras(kg)
Agregado Fino	
2.36 (No. 8)	10
4.75 (No. 4)	10
Agregado Grueso	
9.5	10
12.5	15
19.0	25
25.0	50
37.5	75

Para el caso de las gravas, las muestras fueron tomadas en tres puntos distintos del acopio, empacándolas y transportadas en bolsas plásticas utilizados para evitar la pérdida o contaminación de la muestra. Cada una de las bolsas fue rotulada con el origen y fecha de manera que fuese fácil y clara su identificación como se ve en la Figura 7-3.

La arena utilizada fue una sola, la cual se tomó de la planta más cercana; con la suficiente para desarrollar todo el montaje experimental. Al igual que con la grava, para la toma de muestra se contó con el apoyo de un cargador de manera que se realizara la homogenización por medio mecánico, garantizando la mayor uniformidad posible del material a evaluar.



Figura 7-3. Acopio de los materiales usados para la elaboración de las mezclas, rotulados e identificados con la fecha de recepción. Fuente propia.1

### 6.2.3 Producto en proceso

Durante la investigación se elaboraron 24 diseños; de los cuales 15 corresponden a resistencias convencionales, 5 a los de alta resistencia y 4 para evaluar características especiales. Como se quiere evaluar el impacto del módulo de elasticidad de estos concretos en las estructuras de Colombia, los diseños deben cumplir con las propiedades necesarias de asentamiento inicial, tiempos de transporte y colocación necesarios para ser empleados en las obras, de manera que se estableció un riguroso control en el proceso.

Los diseños que no cumplieron con el asentamiento establecido fueron repetidos hasta encontrarse dentro de los parámetros mencionados de  $7'' \pm 1''$  para los convencionales y  $9'' \pm 1''$  para los de alta resistencia. El ensayo de asentamiento se realizó siguiendo las recomendaciones de la NTC 454 (NTC454, 2011), realizando el montaje del diseño con 35 litros siendo mayor a la recomendación de los 28 litros para el tamaño de la muestra planteado por la norma, mezclando los constituyentes de manera que se garantizara la uniformidad del producto. Una vez mezclado el concreto, el ensayo de asentamiento (NTC396, 2018) y de contenido de aire (NTC1032, 2013) se realizó en los primeros 5 minutos siguientes a la obtención de la muestra.

La Tabla 7-11 presenta los resultados de los parámetros medidos a los concretos convencionales, para cada agregado se elaboraron 3 diseños variando la relación A/C, iniciando con el que tenía menor cantidad de cemento y era el punto de partida para tomar medidas para los siguientes o en caso necesario repetir la mezcla. La dosis de retardante se mantuvo fija para todos los montajes experimentales, siendo este el que aporta a los tiempos de fraguado y transporte, al igual que el agua para cada tipo de agregado; de manera que los resultados entre las distintas A/C fuesen comparables. En cambio, algunos diseños si requirieron disminuir o aumentar dosis de superplastificante, basado en los resultados previos, como el caso del agregado 8 el cual para las muestras 83, se elaboró con una dosis de 0.60% del peso del cemento, dado que estaba en el límite máximo, se aceptó y se redujo la dosis para los dos siguientes, dando  $7 \frac{1}{2}''$  de asentamiento inicial. El ensayo de aire se realizó sólo para el diseño de relación A/C: 0.55 de los 5 agregados, tomando este valor como referencia producto de esa gama de diseños.

Tabla 7-11. Resultados producto en proceso concretos de resistencias convencionales

Diseño	A/C	Agua	Retardante	Super Plastificante	Muestra	Asent Inicial	Asent 1 hora	% aire
C-BOG-1	0.60	180	0.32	0.50	13	7	5	
C-BOG-1	0.55	180	0.32	0.55	14	7 1/2	6	1.6%
C-BOG-1	0.49	180	0.32	0.55	15	7 1/2	6 1/2	
C-MED-3	0.60	180	0.32	0.50	33	7	7 3/4	
C-MED-3	0.55	180	0.32	0.48	34	7 1/2	6 1/4	1.4
C-MED-3	0.49	180	0.32	0.55	35	7 1/4	6	
C-CAL-5	0.60	176	0.32	0.45	53	8	6 1/4	
C-CAL-5	0.55	176	0.32	0.42	54	7	6	1.5%
C-CAL-5	0.49	176	0.32	0.42	55	7 1/2	6 1/4	
C-BAQ-7	0.60	184	0.32	0.60	83	8	6 3/4	
C-BAQ-7	0.55	184	0.32	0.58	84	7 1/2	7	1.50%
C-BAQ-7	0.49	184	0.32	0.58	85	7 1/2	6	
C-SMR-9	0.60	189	0.32	0.60	93	7 1/2	5 1/4	
C-SMR-9	0.55	189	0.32	0.58	94	7 1/2	4	1.80%
C-SMR-9	0.49	189	0.32	0.58	95	7 1/2	4 3/4	

Por otro lado, la *Tabla 7-12* presenta los resultados de producto en proceso para los diseños de alta resistencia, el control de producto en proceso siguió los mismos lineamientos y recomendaciones que los anteriores, pero debido a que se realizó el montaje en paralelo de dos diseños, el tiempo no dio para realizar el ensayo de contenido de aire. Todas las mezclas cumplieron con el asentamiento requerido en el intervalo establecido.

Tabla 7-12. Resultados producto en proceso concretos de alta resistencia

Diseño	A/C	Agua	Retardante	Super Plastificante	Muestra	Asentamiento Inicial
A-BOG-2	0.35	190	0.32	0.85	28	8 1/2
A-MED-4	0.35	192	0.32	0.8	48	8 1/4
A-CAL-6	0.35	184	0.32	0.8	68	8
A-BAQ-8	0.35	192	0.32	0.75	78	9
A-SMR-10	0.35	196	0.32	0.75	108	8 1/2

La *Tabla 7-13* presenta el control de producto en proceso a los concretos realizados con el agregado N°8, a los que se le modificaron algunas propiedades con la finalidad de evaluar su efecto. Para ello se montó un diseño de referencia que es comparable con la muestra 84 de la *Tabla 7-11*, ya que es el mismo diseño, este se realizó junto con las demás muestras especiales, de manera que las condiciones y todo el proceso no alteraran la comparación objetiva de los nuevos parámetros. La muestra E8-2 que se realizó con la adición de una fibra de celulosa, no



afectó el asentamiento inicial, pero si acentuó la pérdida de asentamiento a 1 hora evidenciando la absorción de humedad por parte de la fibra, para ser entregada en el tiempo. La muestra E8-3 se elaboró con micro sílice en remplazo del 7% del cementante, reduciendo la cantidad de cemento del diseño, sin afectar las condiciones de producto en proceso. La muestra E8-4, se elaboró con un agregado que tiene una variación en las propiedades de frontera con la pasta de cemento que modifica la ITZ, ya que el porcentaje de dos caras fracturadas es menor con un 27%; esta modificación aumenta la cantidad de partículas redondeadas y lisas de este agregado, reduciendo la demanda de agua requerida para lograr el asentamiento de diseño, que se refleja en el ensayo, ya que aumento 2 ½” el asentamiento, siendo un resultados esperado y aceptable para este montaje, ya que este comportamiento hace parte de las modificaciones en las propiedades del concreto producto de esta modificación.

Tabla 7-13. Resultados producto en proceso concretos de resistencias convencionales con características especiales, agregado N°8

Diseño	A/Cte	Agua	Retardante	Super Plastificante	Asentamiento Inicial	Asentamiento 1 hora	Característica
E-BAG-RF	0.55	184	0.32	0.58	6 ½	5 1/2	Referencia
E-BAG-FC	0.55	184	0.32	0.58	7	5 3/4	Fibra 1.5 lb/m <sup>3</sup>
E-BAG-7S	0.55	184	0.32	0.58	6 ½	5 1/2	Micro Sílice 7%
E-BAG-MC	0.55	184	0.32	0.58	9	8	CF : 27%

#### 6.2.4 Elaboración de especímenes

El objetivo de esta investigación es evaluar las propiedades asociadas al producto terminado, de manera que la mayoría de las medidas fueron realizadas a las muestras de las probetas cilíndricas elaboradas siguiendo las recomendaciones de la NTC 1377 (NTC1377, 2010).

Para la elaboración de los especímenes se elaboraron las muestras en moldes plásticos, los cuales son no absorbentes y de un nuevo lote, de manera que se garantizaran las dimensiones y tolerancias para que no se vieran afectadas por el uso. La elaboración de las muestras se realizó en los primeros 5 minutos de elaborado el concreto, tomando suficiente material para llenar cada una de las tres capas de igual volumen apisonando cada una de ellas 25 veces, luego de esto se golpea la parte exterior del cilindro entre 10 y 15 veces, una vez se llene el cilindro, se procede a enrazar la parte superior buscando que sea lo más plano y perpendicular posible.

Tabla 7-14. Numero de muestras tomadas por edad

Ensayo/ N cilindros	Edad				Total - Ensayos muestra
	3	7	28	56	
Total - Cilindros por edad	2	4	6	4	16

El número de cilindros individuales medidos para la determinación del diámetro promedio puede ser reducido en uno de cada diez especímenes o tres por día, lo que sea mayor. Para el

caso de las validaciones de los diseños convencionales, cada día se montaron los diseños de cada agregado con sus tres relaciones A/C, siendo un total de 48 muestras, requiriendo medir el diámetro con precisión de 0.25mm de mínimo 4 muestras, para el caso de esta investigación, se midieron los diámetros y alturas de los dos cilindros destinados a tracción indirecta de cada validación. De manera que por cada día se midieron las dimensiones de 6 cilindros presentados en la Tabla 7-15. Los especímenes no deben ser ensayados, si cualquier diámetro individual de un cilindro difiere de otro diámetro del mismo cilindro en más del 2%, criterio que se evaluó teniendo un valor mínimo de 100 mm y el máximo de 100.50 mm que representan el 0.05% para todos los diámetros medidos, lo que hace que se garantice el cumplimiento de la norma (NTC673, 2010).

Tabla 7-15. Medición de dimensiones a los cilindros tomados por día de validación.

Muestra	Fecha Ensayo	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)
83	23/09/2019	201	201	201	100.25	100.25
83	23/09/2019	201	201	201	100.25	100.25
84	23/09/2019	200	200	201	100.25	100.50
84	23/09/2019	202	201	201	100.50	100.25
85	23/09/2019	201	201	201	100.25	100.25
85	23/09/2019	201	201	201	100.25	100.25
93	24/09/2019	201	200	201	100.25	100.25
93	24/09/2019	201	201	201	100.25	100.25
94	24/09/2019	202	202	201	100.25	100.25
94	24/09/2019	202	202	201	100.25	100.25
95	24/09/2019	201	201	201	100.25	100.25
95	24/09/2019	201	201	201	100.25	100.25
13	25/09/2019	201	201	201	100.25	100.25
13	25/09/2019	202	201	201	100.50	100.25
14	25/09/2019	200	200	201	100.50	100.25
14	25/09/2019	200	200	201	100.50	100.00
15	25/09/2019	200	200	201	100.25	100.50
15	25/09/2019	202	201	201	100.50	100.25
33	26/09/2019	200	200	201	100.25	100.50
33	26/09/2019	202	201	201	100.50	100.25
34	26/09/2019	200	200	201	100.50	100.25
34	26/09/2019	200	200	201	100.50	100.00
35	26/09/2019	201	201	201	100.25	100.25
35	26/09/2019	200	202	201	100.50	100.25
53	27/09/2019	200	200	201	100.25	100.50
53	27/09/2019	201	200	201	100.25	100.25
54	27/09/2019	200	200	201	100.50	100.25
54	27/09/2019	201	201	201	100.25	100.25
55	27/09/2019	201	200	201	100.25	100.25
55	27/09/2019	201	200	201	100.25	100.25
Mínimo		200.0	200.0	201.0	100.25	100.00
Máximo		202.0	202.0	201.0	100.50	100.50
Promedio		200.9	200.4	201.0	100.3	100.3

Previo al ensayo se evalúa la planitud y perpendicularidad. En ningún caso los extremos de los especímenes de ensayo deben apartarse de la perpendicularidad a los ejes en más de 5°,

aproximadamente 1mm en cada 100mm, de manera que con los cilindros de 100 mm \* 200 mm usados en este momento, la desviación debe ser menor a 2mm. Para el caso de la planitud, la norma plantea que solo los moldes provistos de dos platos maquinados de metal son los capaces de garantizar este parámetro, cumpliendo con la horizontalidad y rugosidad de la superficie. En esta investigación se usaron moldes plásticos, por lo que es necesario capinar todos los cilindros garantizando este parámetro.

### 6.2.5 Capinado de cilindros

Los cilindros de los especímenes para el ensayo de resistencia a la compresión deben tener una planitud dentro de una tolerancia de 0.05 mm medida a través de cualquier diámetro, para ello los especímenes endurecidos que hayan sido curados pueden ser refrentados con yeso de alta resistencia o moteros de azufre capaces de cumplir con la resistencia requerida.

En esta investigación se decidió realizar el refrendado con yeso de alta resistencia sin adiciones posteriores a su fabricación. Para ello se requiere que este material posea una resistencia mínima a la compresión de 34.5 MPa, comprobada en cubos de 50 mm de lado (NTC504, 1995). Los cuales fueron elaborados de acuerdo con lo planteado por la NTC 490(NTC490, 1971) y corroborado la idoneidad del material a usar para este proceso.

Para el capinado de los cilindros se usó un yeso rosado tipo IV el cual se presenta en la Figura 7-4 este producto ofrece resistencias a edades tempranas superiores a los 34 MPa. De manera que se estableció un programa experimental capaz de caracterizar el yeso dando garantía de su eficiencia.



Figura 7-4 *Yeso tipo IV, importado por YESOS AMERICA LTDA.*

Se realizaron validaciones de consistencia y resistencia en cubos, de manera que se tuviera una que permitiera la adecuada colocación y acabado. Para definir la mezcla que cumpliera se probaron con dosis de agua de 22 g, 24 y 26 g por cada 100 g de yeso. La

Figura 7-6 muestra el pesaje de una de las combinaciones planteadas, estas se realizaron con las recomendaciones de temperatura y tiempos de mezclados propuestos en la NTC 490, este procedimiento se llevó a cabo con la mezcladora presentada en la Figura 7-7, tomando los cubos mostrados en la Figura 7-5; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, ensayados a 4 – 6 y 24 horas capaces de ver el comportamiento en el tiempo.



Figura 7-6. Pesaje de yeso y agua para la mezcla usada para el capinado.



Figura 7-7. Mezclado del yeso siguiendo la recomendación de la NTC 490

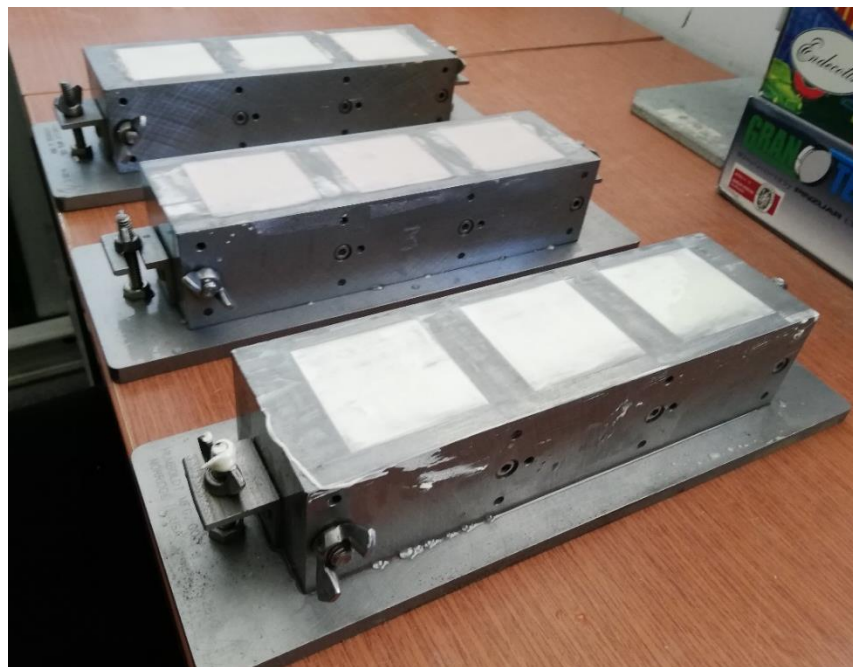


Figura 7-8. Elaboración de cubos de 50 mm para ensayo de resistencia al mortero de yeso de alta resistencia.

Para el ensayo a compresión, fue necesario usar el marco usado para fallar las vigas el cual está calibrado en un rango de 0 a 100 KN, siendo capaz de medir con la precisión requerida Figura 7-10.

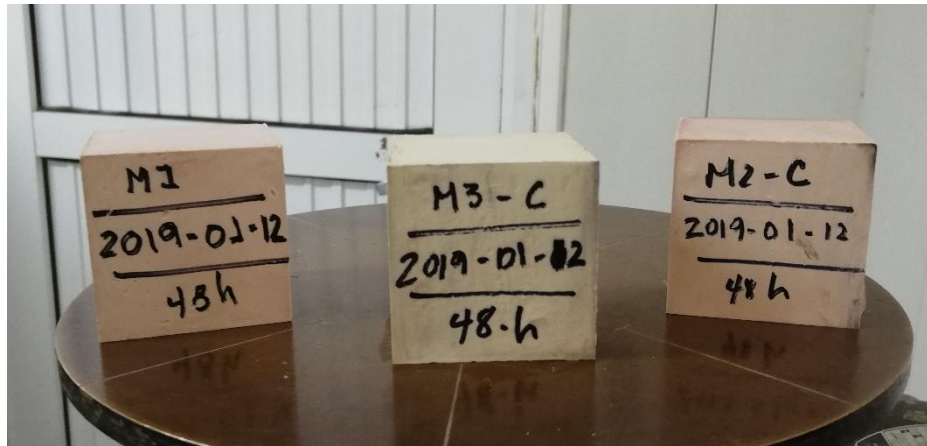


Figura 7-9 Cubos de yeso con distintas cantidades de agua.





Figura 7-10. Ensayo a compresión de los cubos de 50 mm con yeso de alta resistencia.

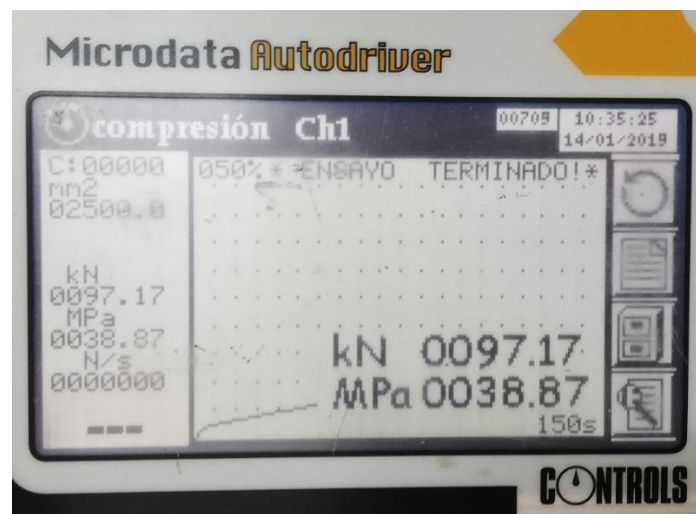


Figura 7-11. Resultado de resistencia a 2 horas del mortero con mejor desempeño.

Del resultado del análisis experimental realizado a con los cubos que se presentan en la Figura 7-9, se obtuvo que la cantidad de agua óptima para lograr la manejabilidad y resistencia fue de 24 gramos por cada 100 gramos de yeso, llegando a resistencias de 38 MPa Figura 7-11, capaces de cumplir con lo establecido en la norma para este tipo de refrendados.

### 6.2.6 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es una de las propiedades constitutivas de los materiales, por lo que es de gran importancia conocer con la mayor calidad y exactitud su resultado. La (ASTM C469, 2014), establece el método para la determinación del módulo de elasticidad de la cuerda o módulo de Young's, el cual consiste realizar registros de la deformación a medida que se incrementa la carga. La aplicación de la carga debe ser continua y sin impactos con una velocidad de  $0.25 \pm 0.05$  Mpa/seg. La norma establece que para su ejecución se requieren por lo menos tres ciclos de carga sin interrupciones, registrando la carga aplicada en dos puntos importantes; la carga cuando se logra una deformación  $e_0 = 50$  micrometros y un segundo punto que es la deformación  $e_0$  al 40% de la carga ultima a compresión con los que se forma la pendiente que representa el valor buscado.

La norma plantea la alternativa que en caso de requerir la gráfica de esfuerzo deformación, se registren valores intermedios a lo largo de la ejecución de este ensayo, haciendo énfasis en la sincronización de la información tomada entre el esfuerzo y la deformación. Uno de los alcances de esta investigación es establecer el valor de  $e_0$ , por lo que el ensayo de cada cilindro se realizó con un solo ciclo de carga, evitando la generación de micro fisuras que alteraran generaran deformaciones permanentes modificando la deformación al esfuerzo máximo. Los ciclos de carga adicionales se realizan con la finalidad de que el equipo de medición de deformación se acomode al cilindro y se verifique que este correctamente anclado, el equipo de deformación utilizado garantiza ese correcto ensamble. De igual manera antes de definir este procedimiento, se realizaron ensayos con los ciclos de carga adicional, evidenciando que no se presentaron variaciones en la respuesta del módulo de elasticidad con un solo ciclo de carga.





Figura 7-12. Equipo para la adquisición de datos DataLog8"Controls".



Figura 7-13. Transductores de desplazamiento Controls con sensibilidad de  $0.02\mu\text{m}$ , alimentación hasta 10V, recorridode  $\pm 1.5\text{mm}$ . Elaboración propia

Para la obtención de los puntos intermedios se usó un equipo de adquisición de datos de la marca Controls DataLog 8 Figura 7-12, con capacidad de 8 canales analógicos de control

independiente, al cual se le conectó un transductor de presión y tres transductores de desplazamiento electrónicos fabricados bajo la norma ASTM C469 con sensibilidad de 0.02  $\mu\text{m}$ , con alimentación de hasta 10 V Figura 7-13, ajustables en altura y con un recorrido de  $\pm 1.5\text{mm}$ .

Cada muestra fue ensayada bajo este procedimiento y con el montaje experimental presentado en la Figura 7-14, generando un archivo con el registro de la carga y las deformaciones registradas por cada transductor. Dado que se contaba con tres registros de deformación, se definió trabajar la deformación de cada muestra como el promedio de estos datos. Los resultados de cada muestra son el producto del análisis a detalle de cada ensayo, definiendo el valor de  $f_c$ , el 40% de  $f_c$  y la deformación al esfuerzo máximo.



Figura 7-14. Ensamble experimental de cada cilindro, con sus tres transductores de deformación, presión y adquisición de datos.

### 6.2.7 Ultrasonido

La velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en concreto, es un ensayo no destructivo realizado para predecir propiedades del concreto en estado endurecido, cuyo resultado depende de muchas variables, identificando discontinuidades, uniformidad del concreto, cambios de las propiedades del concreto en el tiempo y propiedades mecánicas del concreto.

Un pulso de vibraciones longitudinales es producido por el transductor electroacústico, que atraviesa una longitud conocida (L) en el concreto, las vibraciones son convertidas en una señal electroacústica por el segundo transductor, que por medio del equipo es capaz de medir el tiempo para el recorrido del pulso (T), permitiendo calcular una velocidad (V) siendo este el resultado del ensayo.

Los ensayos realizados en esta investigación se realizaron de acuerdo a las recomendaciones y procedimientos establecidos en la (NTC4325, 1997), las lecturas se realizaron con el equipo PUNDIT® PL-200 de la siguiente manera :

- Todas las muestras se encontraban debidamente rotulados y se ensayaron en la fecha correspondiente.
- Todos los cilindros se encontraban sumergidos en la pileta de curado, bajo los lineamientos establecidos en la (NTC550, 2018).
- Cada una de las muestras se retiraban media hora antes de realizar las lecturas, con la finalidad que las probetas se encontraran saturadas y superficialmente secas (SSS), garantizando condiciones de humedad iguales para todas las muestras.
- Todos los ensayos se realizaron en las mismas condiciones de temperatura de  $30 \pm 2^\circ$ .
- La longitud de la trayectoria fue medida con la aleatoriedad propuesta en la (NTC673, 2010), con una longitud promedio de 200.4 mm, cuyo valor fue usado para el cálculo de todas las velocidades.
- Cada cilindro se colocó sobre un material de neopreno, evitando alteraciones de las lecturas por parte de otros materiales.
- Con la finalidad de garantizar el correcto acople de los transductores con las probetas de concreto, se utilizó gel ultrasónico, presionando de manera constante cada uno de estos en cada muestra.
- Se realizaron 5 lecturas a cada una de las muestras, permitiendo trabajar con un valor promedio para cada probeta.
- Luego de realizar las lecturas, se procedió al capinado de los cilindros, para ser ensayadas el mismo día.
- Con toda la información disponible se analizaron los resultados de cada diseño a las distintas edades medidas.



Figura 7-15 Equipo usado para el ensayo de VPU.

### 6.2.8 Resistividad

La resistividad eléctrica ( $\rho$ ) de un material es su capacidad para resistir la transferencia de iones sometidos a un campo eléctrico. La siguiente ecuación presenta la relación entre la diferencia de potencial eléctrico (voltaje) y una corriente que atraviesa el sistema evaluado (intensidad), es por ello que es normalizado por las dimensiones y longitud del elemento de manera que se pueda caracterizar el comportamiento del material (Mehta & Monteiro, 2006).

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (6)$$

Hay distintos factores que afectan la resistividad del concreto y pueden ser divididos en dos grupos. Factores internos que afectan la resistividad eléctrica, como: relación A/C, edad, adiciones, estructura de poros, entre otras y factores que afectan la medición de la resistividad, como: geometría del elemento, humedad, temperatura, espaciamiento del electrodo y la presencia o no de refuerzo. Poros saturados y temperaturas altas resultan en resistividades más bajas para el concreto (Azarsa & Gupta, 2017).

Es por ello por lo que los ensayos se realizaron bajo el siguiente procedimiento capaz de controlar las variables que afectan los resultados en este ensayo:

- El concreto debe estar limpio, libre de aceites y otros contaminantes.
- Se garantiza que la superficie de contacto este húmeda, pero no saturada, capaz garantizar el flujo eléctrico.

- Se coloca una esponja húmeda en cada extremo del cilindro, garantizando el contacto entre el cilindro y el equipo de medición.
- Las placas metálicas utilizadas para el ensayo se colocaron sobre una placa de neopreno evitando el flujo de la corriente eléctrica en la dirección no deseada.
- Una vez montado el experimento se aplica el voltaje, obteniendo la resistencia eléctrica del concreto medido en ohms ( $\Omega$ ) y la resistencia eléctrica de las esponjas utilizadas en el ensayo.
- Esta lectura se realiza en tres ocasiones para cilindro, tomando el promedio como el dato que representa cada muestra.
- Con la geometría de cada cilindro de concreto se calcula la resistividad, tomando como área la sección transversal en contacto con las placas de acero y la longitud del elemento, como se presenta en la Figura 7-16.



Figura 7-16 Ensayo de resistividad eléctrica de dos puntos.

### 6.2.9 Tensión indirecta

Este ensayo permite determinar la tensión indirecta de especímenes cilíndricos del concreto, la cual se realizó bajo el procedimiento establecido en la (NTC722, 2000).

El método de ensayo consiste en la aplicación de una fuerza de compresión diametral en la longitud del espécimen de concreto a una velocidad constante. Induciendo esfuerzos de tensión en el plano sobre el que se aplica la carga, siendo esta la mayor dimensión de las probetas, con esfuerzos de compresión en el área cercana a la aplicación de las cargas. El montaje experimental del ensayo permite que la falla sea por tensión y no por compresión, ya que las zonas que se ven sometidas a compresión se encuentran en una condición triaxial, garantizando valores superiores a los que arroja el ensayo a compresión uniaxial, garantizando la falla de la manera deseada.

Este ensayo al ser destructivo, solo se realizó a la edad de 28 días a las tres relaciones a/c elaboradas con cada agregado del grupo convencional, bajo los siguientes lineamientos.

- Se verifico el cumplimiento del equipo para la ejecución de los ensayos.
- Se recortaron listones de madera contra enchapada con espesor de 3.2 mm con un ancho promedio de 25 mm, las cuales no son reutilizables, requiriendo un par por ensayo.
- Cada una de las muestras se retiraban media hora antes de realizar las lecturas, con la finalidad que las probetas se encontraran saturadas y superficialmente secas (SSS), garantizando condiciones de humedad iguales para todas las muestras.
- Todos los ensayos se realizaron en las mismas condiciones de temperatura de  $30 \pm 2^\circ$ .
- Cada muestra se marcó con el objetivo de garantizar la adecuada colocación en el equipo.
- Para el ensamble de cada espécimen, fue necesario centrar un listón de madera en la placa inferior, colocando encima la muestra, de manera que las marcas verticales queden alineadas con la placa superior centrada sobre el listón de madera, como se presenta en la Figura 7-17.
- Finalmente, el ensayo se ejecuta bajo una carga lineal, sin impactos a una velocidad constante de entre los 700 kPa/min a 1,400 kPa/min, hasta llegar a la falla, registrando la carga.
- La resistencia a la tensión indirecta se calcula bajo la siguiente formula, siendo P la carga al final del ensayo y l y de las dimensiones medias del cilindro.

$$T = \frac{2 \times P}{\pi \times l \times d}$$



Figura 7-17 Equipo usado para el ensayo de tensión indirecta.



# Capítulo 8. Resultados

---

## 8.1 Producto en proceso del montaje experimental

El capítulo Anterior. presentó los criterios de diseños utilizados para el montaje experimental, cuyos resultados se presentan en este capítulo. Uno de los criterios al especificar el tipo de concreto es el asentamiento que facilitará los retos de colocación. Actualmente, y gracias al avance de los sistemas constructivos, el mayor volumen de concretos premezclados se produce con asentamiento de  $7'' \pm 1''$ ; en los casos donde las cuantías de cemento son altas, este valor se incrementa a  $9'' \pm 1''$ , permitiendo ser bombeados, para incluso, llegar a grandes alturas.

La Figura 8-1 presenta los resultados de producto en proceso (concreto en estado fresco) de los concretos convencionales, la primera fila muestra que los consumos de agua se mantuvieron constantes para las distintas relaciones Agua/Cemento (a/c) de cada fuente de agregado. Los agregados 1, 3 y 5 corresponden a TMN  $1''$  y los 8 y 9 a TMN  $\frac{3}{4}''$ ; siendo estos últimos, los que requirieron mayores consumos de agua por su mayor área superficial. La segunda fila presenta la absorción de los agregados, ya que este es un parámetro de partida al momento de definir los consumos de agua por metro cubico de concreto, esperando una relación directa. La tercera y cuarta fila presentan el asentamiento inicial y a una hora de la elaboración y la quinta fila presenta los resultados de contenido de aire. A lo largo de la elaboración de los diseños de mezcla, fue necesario repetir algunas validaciones hasta garantizar que todas se encontraran dentro del rango del asentamiento inicial de  $7'' \pm 1''$  y contenido de aire inferior al 3%. El asentamiento a una hora es un parámetro de control en la producción que garantiza el tiempo necesario para el transporte y la adecuada colocación del concreto.

Las dosis de aditivos presentaron variaciones dentro del rango inicialmente propuesto, esto con la finalidad de compensar las variaciones de los asentamientos iniciales. Por ejemplo, en el caso del agregado 5, el asentamiento para el diseño con  $a/c = 0.6$  fue  $8''$ , fue necesario reducir de 0.45% a 0.43% la dosis de superplastificante, evitando que de esta manera se superara el límite requerido, que se refleja en una reducción de asentamiento a  $7''$  en el diseño con relación  $a/c = 0.55$ , para el diseño de  $a/c = 0.49$  se mantiene la última dosis de superplastificante obteniendo un asentamiento dentro de lo requerido. De igual manera se ajustaron dosis de aditivo superplastificante en un rango de  $\pm 0.03\%$  para los casos necesarios; teniendo como premisa, mantener la misma cantidad de agua para las distintas  $a/c$  por agregado. Todos los resultados obtenidos a partir de estos diseños son comparables y son reproducibles a nivel industrial, de manera que los datos analizados se encuentran en las mismas condiciones y son capaces de representar el concreto usado en las estructuras de Colombia.

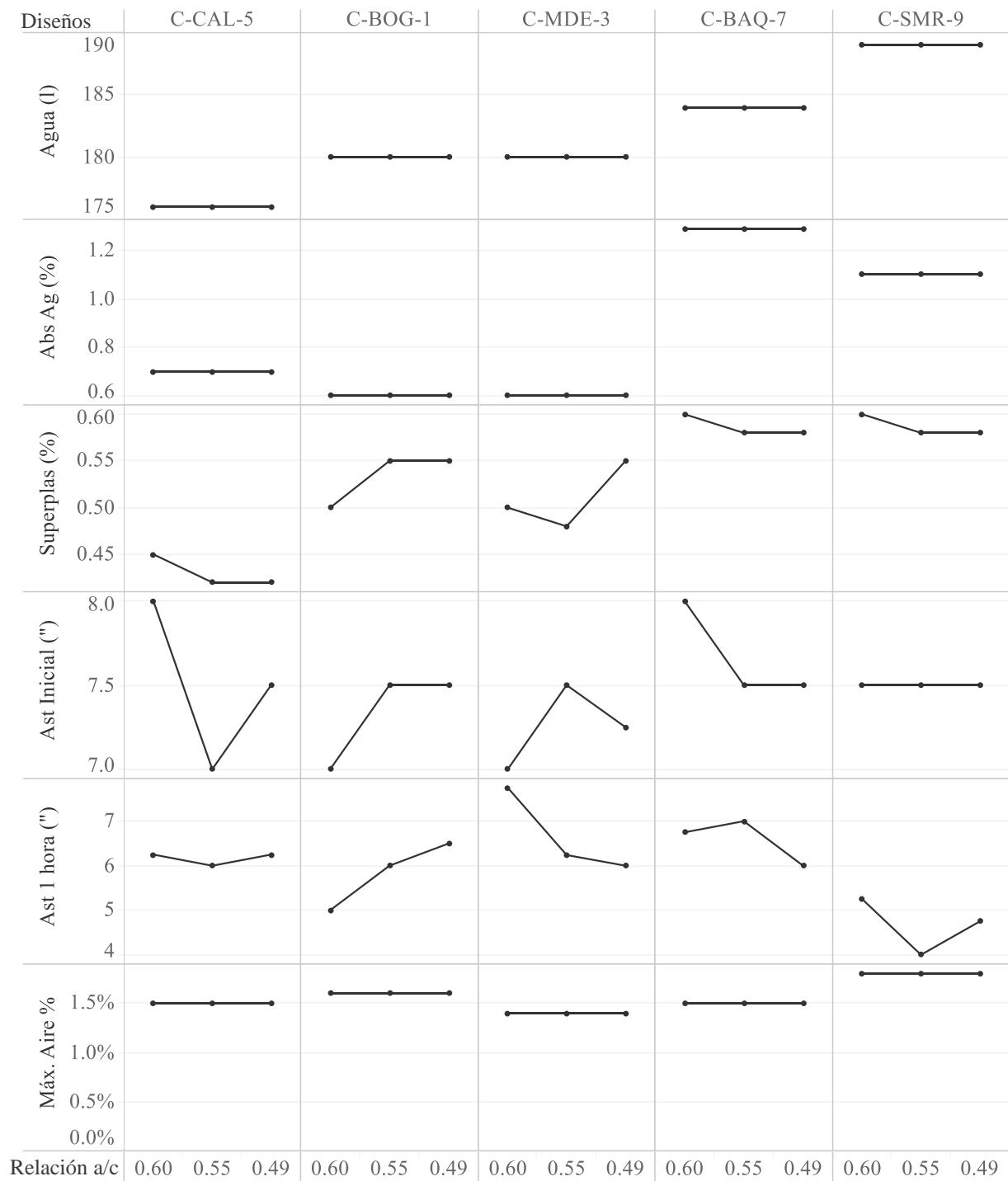


Figura 8-1 Producto en proceso de concreto, para los diseños convencionales de las distintas fuentes agregado por relación a/c.



La Figura 8-2 presenta los resultados de producto en proceso de los diseños de alta resistencia, se realizaron con un solo tamaño de agregado ( $\frac{1}{2}$ " TMN), con consumos de agua entre los 184 a los 196 l/m<sup>3</sup> y dosis de aditivo entre 0.75% y 0.85%, mayores que los diseños convencionales debido a las grandes cuantías de cemento y el aumento en las caras fracturadas de los agregados producto de su reducción de tamaño. Los asentamientos obtenidos varían entre 8" y 9", y se ubican en el límite inferior previsto para este tipo de diseños.

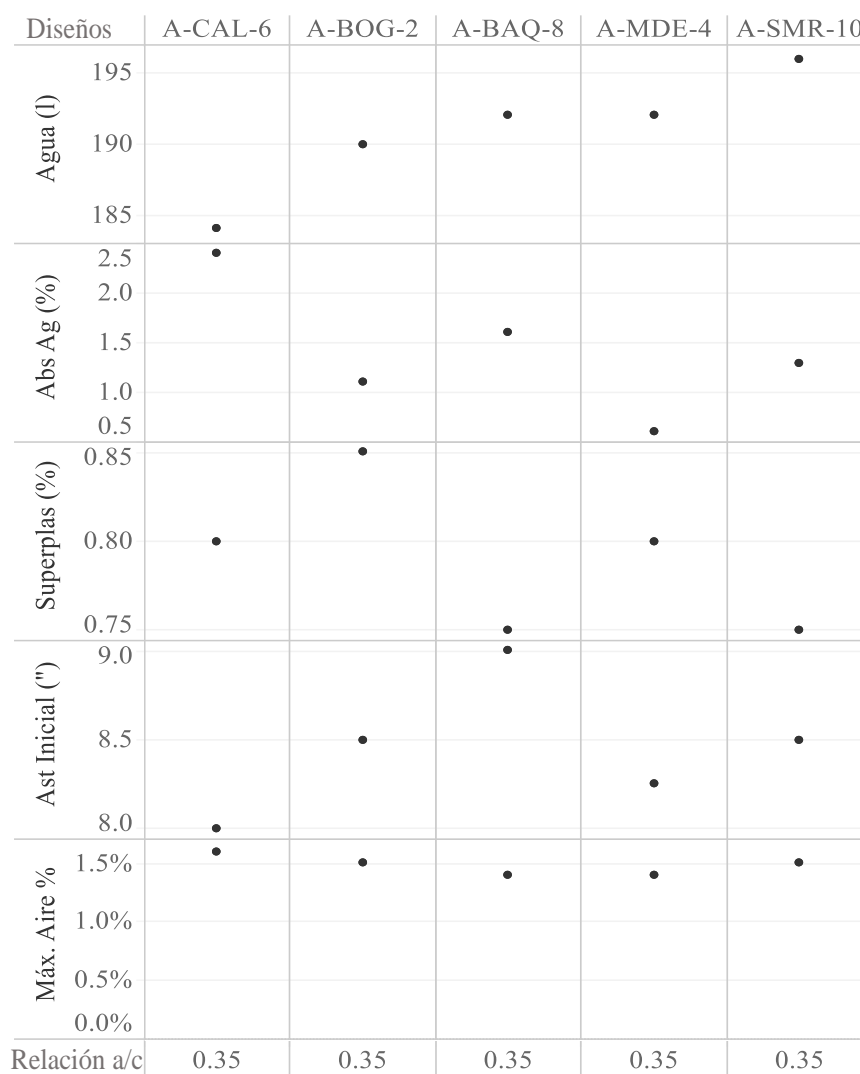


Figura 8-2 Producto en proceso de concreto, para los diseños de alta resistencia de las distintas fuentes agregado con relación a/c = 0.35.

El comportamiento de producto en proceso de los diseños especiales se presenta en la Figura 8-3, los cuales se realizaron con el agregado # 7 con TMN  $\frac{3}{4}$ ", manteniendo el consumo de agua en 184 l/m<sup>3</sup>, igual al usado en el grupo de los diseños convencionales C-BAQ-7, del cual se repite su montaje E-BAQ-RF con este grupo de ensayos para tener un punto de comparación, evaluando el efecto de las modificaciones de los diseños propuestos. En este conjunto de diseños se mantuvieron las dosis de aditivo, observando que para los diseños con sílice al 7% (E-BAQ-7S) y el uso de fibra de celulosa E-BAQ-FC no se presentaron modificaciones considerables en los parámetros de producto en proceso. Esto contrasta con los resultados del diseño con modificación del porcentaje de caras fracturadas E-BAQ-MC, el cual arrojó un mayor asentamiento inicial, que va acorde a la literatura (Poole & Sims, 2016) donde se ha encontrado que agregados con superficies lisas, presentan mayor fluidificación, reduciendo la fricción interna de las partículas requiriendo menores cantidades de agua, para lograr el asentamiento requerido.

Diseños	E-BAQ-7S	E-BAQ-FC	E-BAQ-MC	E-BAQ-RF
Agua (l)	184	184	184	184
Abs Ag (%)	1.29	1.29	1.29	1.29
Superplas (%)	0.58	0.58	0.58	0.58
Ast Inicial (")	7	7	9	7
Relación a/c	0.55	0.55	0.55	0.55

Figura 8-3 Producto en proceso de concreto, para los diseños especiales realizados con el agregado #7 con a/c = 0.55.

## 8.2 Tipos de agregados y su influencia en las propiedades del concreto

El origen de los agregados juega un papel importante en las propiedades fisicoquímicas del concreto. Estos pueden ser de origen ígneo, sedimentario, metamórficos o monominerales. La Figura 8-4 presenta los porcentajes según tipo de origen de las partículas de los agregados usados en esta investigación. Se anota que un mismo agregado puede tener partículas de distintos orígenes. Las mayores proporciones de agregado corresponde a origen ígneo, las cuales provienen de la solidificación de magma. Para este trabajo de investigación se cuenta con tres agregados (1, 3 y 5) con más del 50% correspondiente a este origen. Solo el agregado 9 posee el 100% de sus partículas metamórficas, cuya formación corresponde a modificaciones de agregados provenientes de otros orígenes que se consolidaron. El agregado 8 es de origen sedimentario principalmente, siendo agregados muy estables y de forma redondeada producto de su exposición a escorrentías, generando bancos de material característicos de este tipo de agregados.

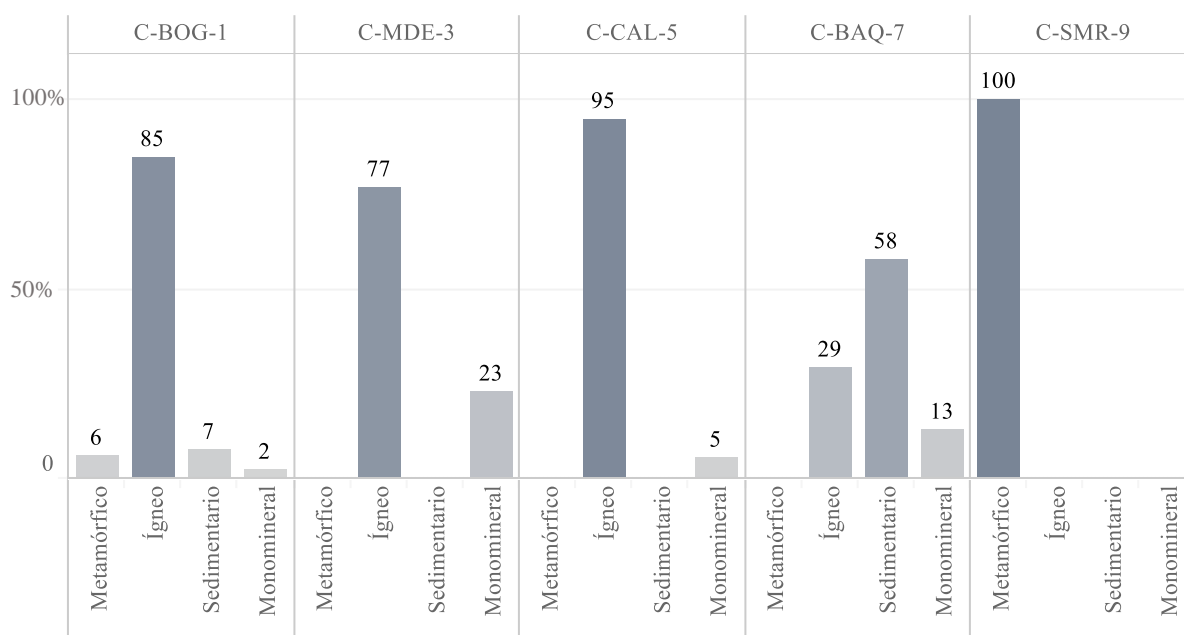


Figura 8-4 Porcentaje por tipo de partículas de cada agregado.

La

Figura 8-5 presenta la frecuencia de los porcentajes del tipo de origen de los agregados, respecto a la resistencia a la compresión obtenida de los concretos diseñados con estos, los valores y la intensidad presentan qué tan alta es la presencia de cada origen a lo largo de las resistencias obtenidas. Los agregados con partículas ígneas generan diseños de mezcla con

mayores resistencias, para una relación a/c:0.55 se obtuvo una media de 37.6 MPa. En contraste, los agregados de origen sedimentarios, para los cuales solo uno posee un solo agregado con este contenido, muestra una tendencia con valores menores de resistencia respecto al resto, para una relación a/c:0.55 se obtuvo una media de 35.6 MPa. Agregados con presencia de partículas metamórficas facilitan las altas resistencia a la compresión para una relación a/c:0.55 se obtuvo una media de 36.2 MPa., mostrando su influencia en las propiedades físico-mecánicas del concreto, mientras que la presencia de partículas monominerales es baja en los agregados analizados de manera que no reflejan un comportamiento marcado en la resistencia a la compresión.

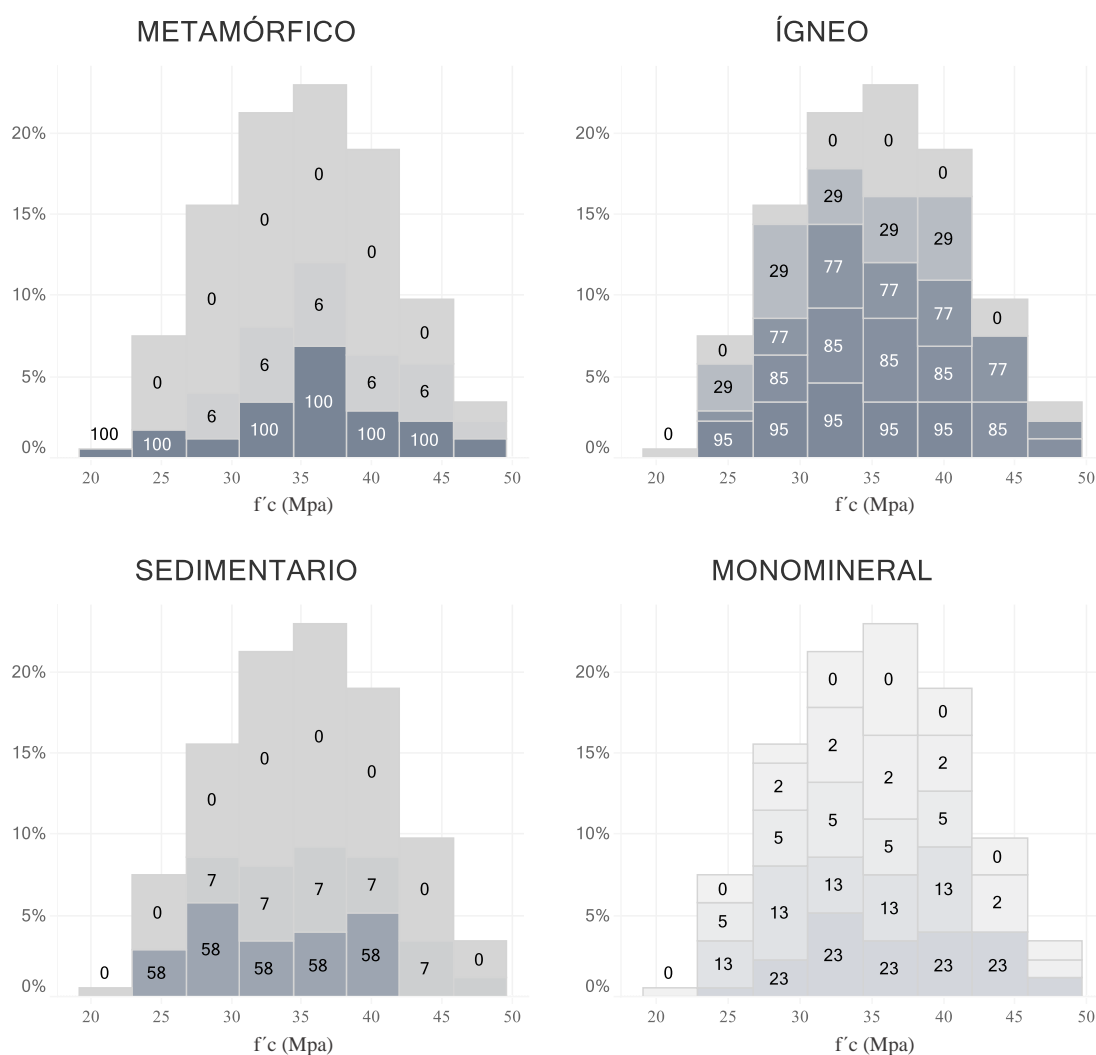


Figura 8-5 frecuencia de los porcentajes del tipo de origen de los agregados, respecto a la resistencia a la compresión obtenida

Otro parámetro que impacta los resultados a la compresión es la textura del agregado, La Figura 8-6 muestra la distribución relativa de resistencia a la compresión y las contribuciones de la textura. Los agregados fracturados con textura rugosa permiten obtener

resistencias a la compresión mayores hasta en un 10% respecto a agregados poco fracturados y de superficie lisa (Güçlüer, 2020). Se observa que el agregado # 7 genera las menores resistencias, el agregado 5 se encuentra en la parte media aun cuando la mayoría de sus partículas de origen ígneo como los agregados 1 y 3, los cuales junto a los diseños elaborados con el agregado 9 generan los valores más altos de resistencia a la compresión de las mezclas.

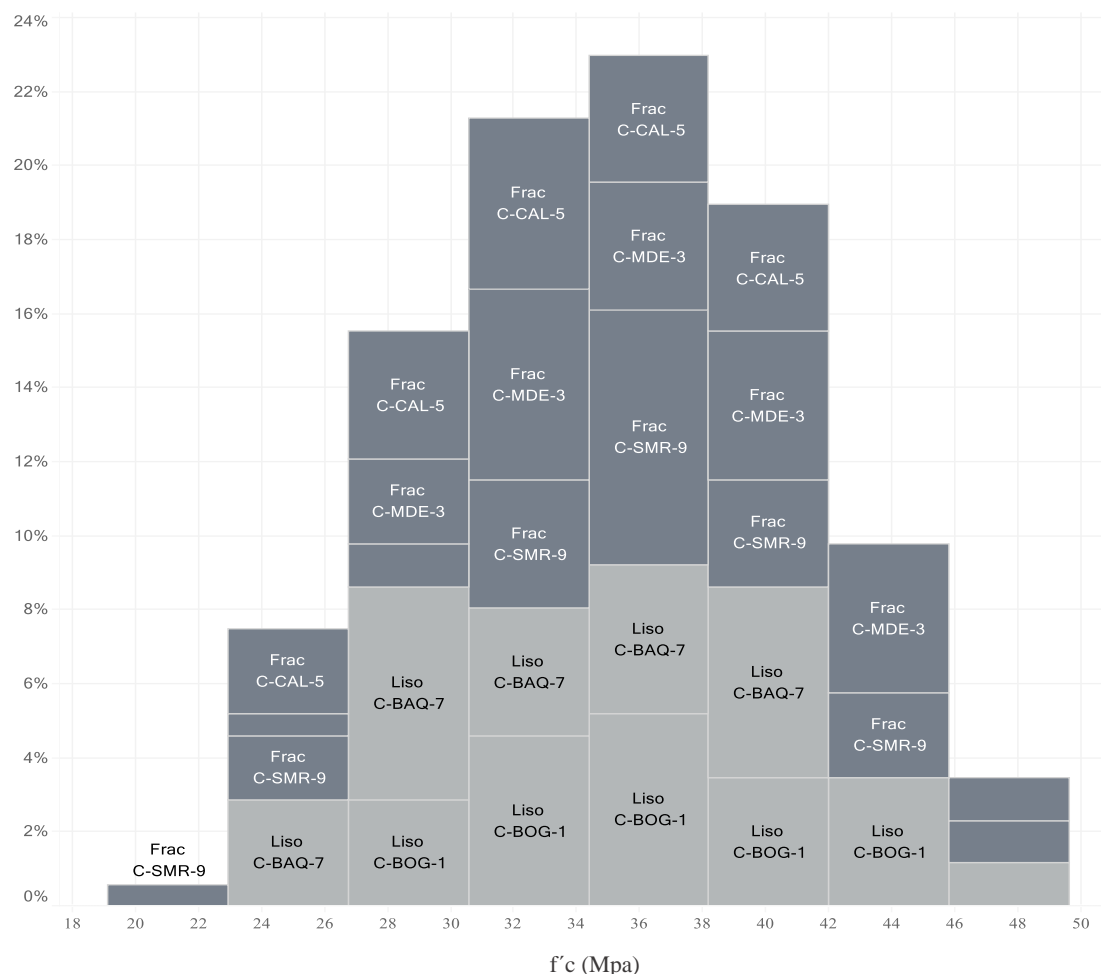


Figura 8-6 Influencia de la superficie del agregado en la resistencia a la compresión.

El origen y el tipo de agregado influyen en la resistencia a la compresión, el cual es uno de los parámetros más relevantes del concreto y sobre el que se plantean diversas correlaciones capaces de estimar este valor, como es el caso de la resistividad y la velocidad de pulso ultrasónico.

### 8.3 Propiedades mecánicas del concreto

La adecuada selección de los materiales al momento de realizar un diseño de mezcla es importante para el desempeño de este, de manera, que un diseño será óptimo, si cumple con los requisitos de la obra y es viable económicamente; debido a que, para cumplir con las

especificaciones, existen varios caminos capaces de lograr los objetivos, que tendrán implicaciones en los costos de producción.

La Figura 8-7 presenta los resultados a la compresión por agregado y relación agua-cemento a los 28 días, que es la edad a la que especifica la mayoría de los concretos. Se observa que para  $a/c = 0.6$ , los agregados 1, 3 y 9 generan valores cercanos a los 33 MPa, el agregado #5 llega a 31 MPa, y el de menor desempeño es el agregado #7 con 29 MPa. Esta tendencia se mantiene para las otras dos relaciones  $a/c$  evaluadas, con una diferencia alrededor de los 3 MPa entre los agregados de mayor y menor desempeño.

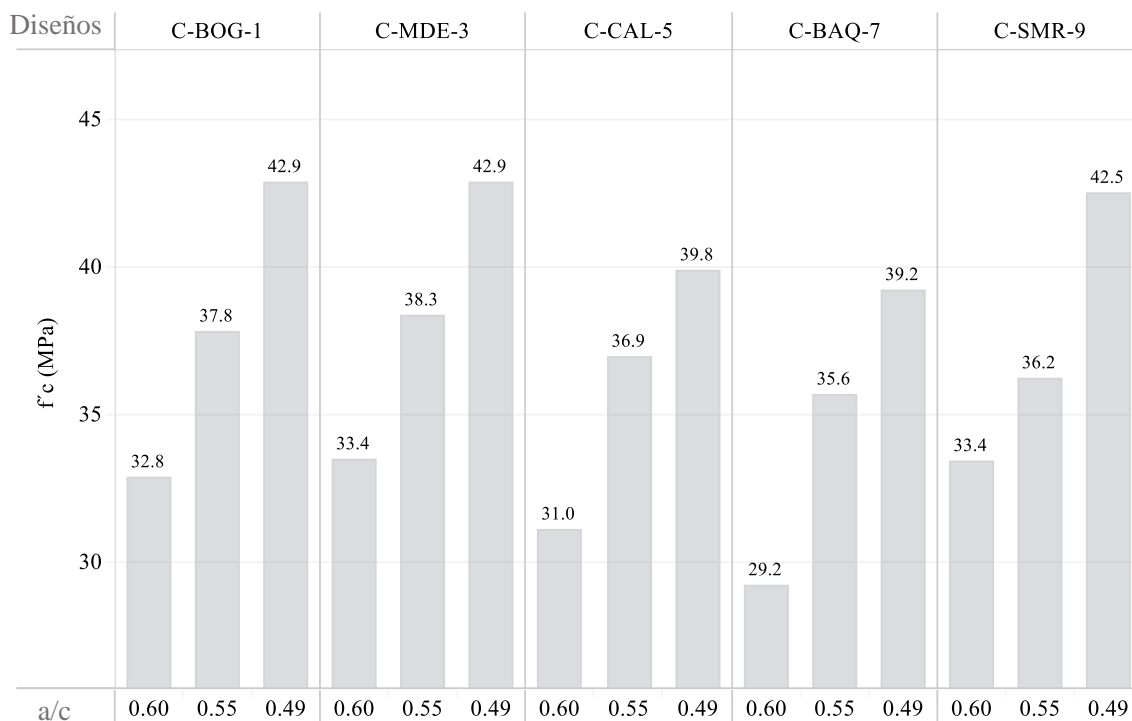


Figura 8-7. Resistencia a la compresión por tipo de agregado a 28 días, para los diseños convencionales con relaciones agua/cemento: 0.6 – 0.55 – 0.49.

La evolución de la resistencia con edad y tipo de agregados se presentan en la Figura 8-8, Figura 8-9, Figura 8-10 para  $a/c$  de 0.60, 0.55, y 0.49, respectivamente. Como se menciona anteriormente, se mantiene la diferencia entre los agregados 1-3 y #9 respecto al agregado #7, el cual genera un menor desempeño en la resistencia a la compresión, incrementando la diferencia con el aumento de la edad del ensayo, no se observa un incremento considerable de 28 a 56 días para este agregado con la relación  $a/c$  de 0.49; esto está ligado a lo presentado en el capítulo anterior, que es un agregado en mayor proporción sedimentario con superficie lisa con un porcentaje promedio de 80% de dos caras fracturadas, lo que disminuye la trabazón del agregado, haciendo de la ITZ una zona más débil reduciendo la capacidad a compresión (Hong et al., 2014).

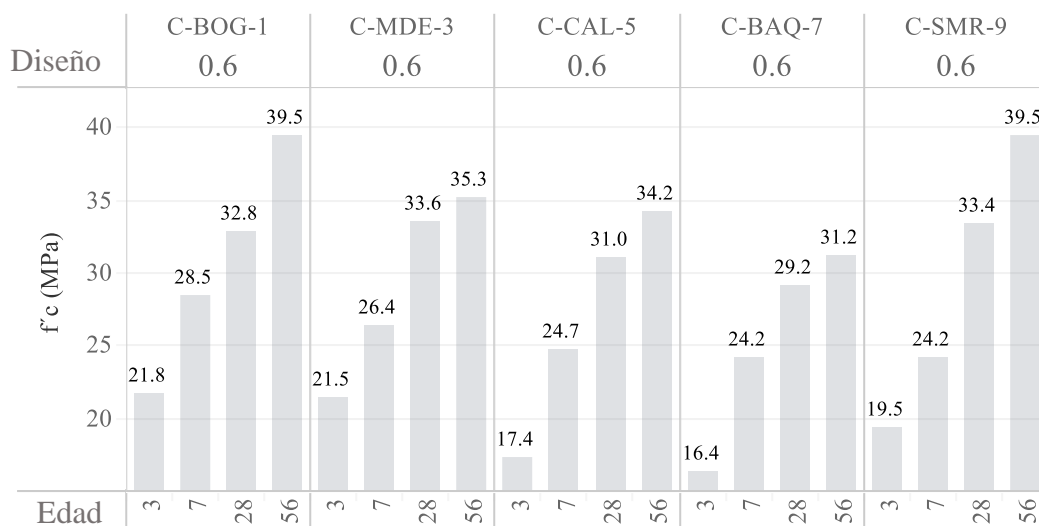


Figura 8-8. Resistencia a la compresión por tipo de agregado, de los diseños convencionales con relación agua/cemento: 0.60, en las edades evaluadas

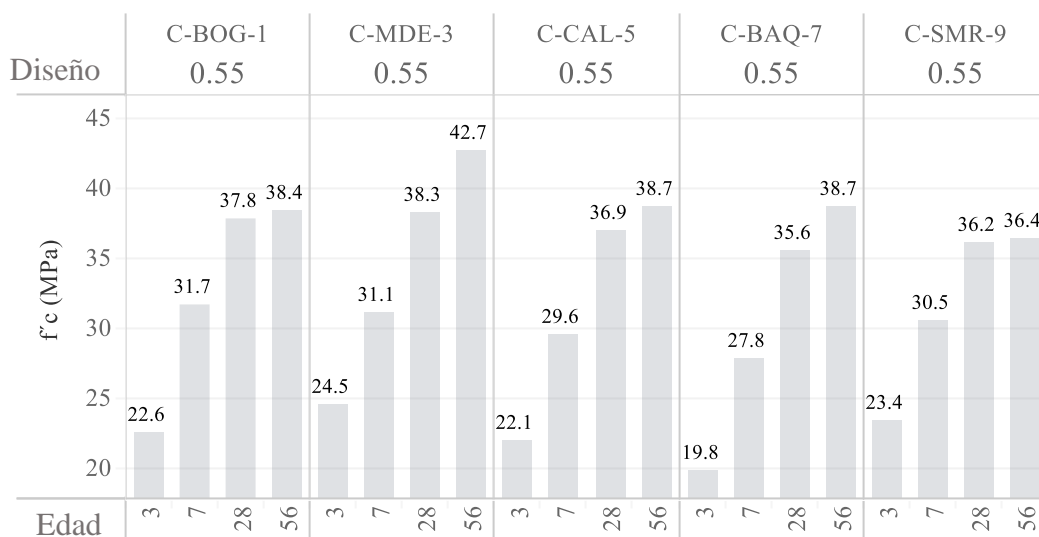


Figura 8-9. Resistencia a la compresión por tipo de agregado, de los diseños convencionales con relación agua/cemento: 0.55, en las edades evaluadas

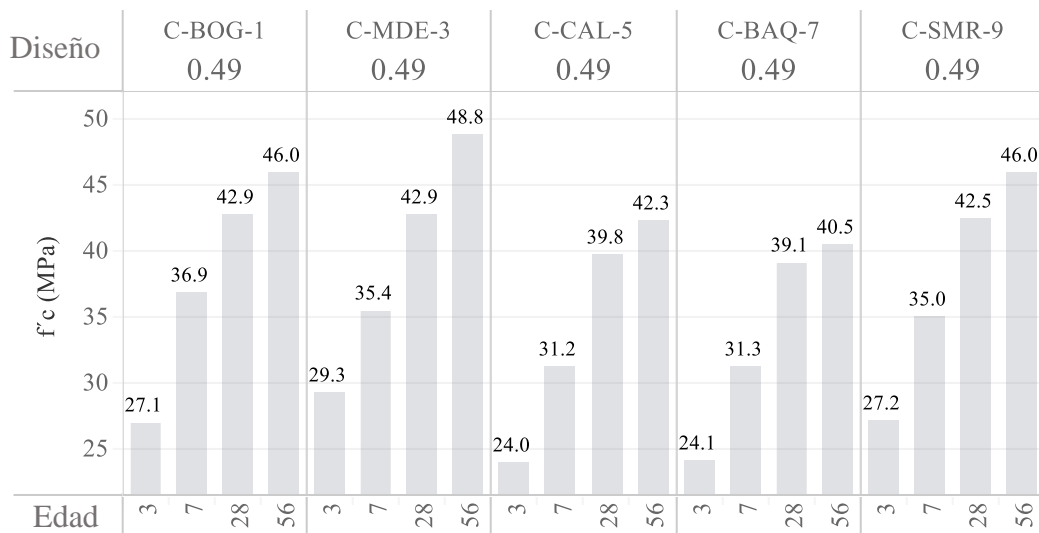


Figura 8-10. Resistencia a la compresión por tipo de agregado, de los diseños convencionales con relación agua/cemento: 0.49, en las edades evaluadas

La Figura 8-11 presenta los resultados a compresión de los diseños de alta resistencia, los resultados a compresión a 28 días presentan una variación porcentual más baja que los diseños convencionales, con valores entre los 80 – 90 Mpa. En este tipo de diseños, las grandes cuantías de cemento dominan el resultado final, donde las propiedades físicas del agregado quedan en segundo plano, ya que cuando se trabaja con concretos superiores a los 50 Mpa, los planos de falla se presentan menos sobre la matriz y más por el agregado llevándolos al límite presentándose aplastamiento de estos (Wu et al., 2001).

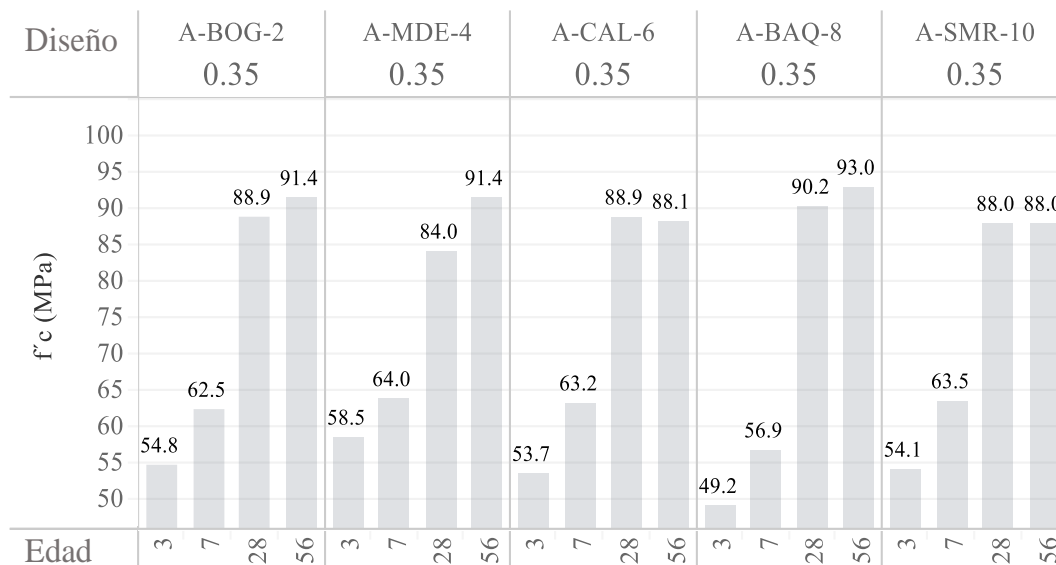


Figura 8-11 Resistencia a la compresión por tipo de agregado, para los diseños de alta con relación agua/cemento: 0.35, en las edades evaluadas



La Figura 8-12 presenta los resultados a la compresión a las distintas edades medidas de los concretos especiales, los resultados de la muestra E-BAQ-RF corresponden al mismo diseño de la muestra 7, realizado en una fecha distinta con la finalidad de evaluar la repetibilidad de la información y tener un punto referencia para comparar los resultados obtenidos de las mezclas especiales. Aun cuando se esperaban ciertos comportamientos asociados a las modificaciones realizadas a los diseños, los resultados promedio a la compresión de los diseños no presentan variaciones importantes entre ellos.

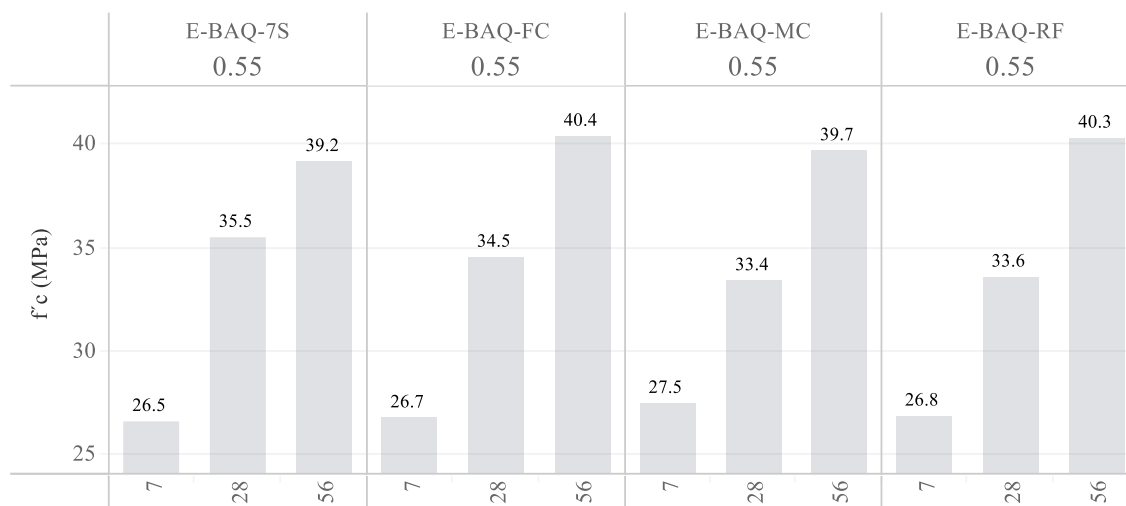


Figura 8-12 Resistencia a la compresión por tipo de agregado, para los diseños especiales con relación agua/cemento: 0.55, en las edades evaluadas

La Figura 8-13, presenta la relación de los costos de producir concreto con las tres relaciones a/c para cada agregado respecto a la condición local de producción, en diferentes ciudades de Colombia. El costo de producción actual de cada ciudad está asociada a los costos de la materia prima (costo de venta de cada proveedor), las distancias a la planta de producción (para cada ciudad se midieron las distancias entre las canteras y las plantas de concreto, tomando un costo de transporte de \$250/T km) y el diseño de mezcla requerido para cada agregado asociado a los consumos de agua y el desempeño mecánico, reflejado en el promedio de resistencia a la compresión a 28 días. Anteriormente se presentó que no se obtuvieron los mismos resultados para las distintas mezclas con cada agregado, aun cuando se mantuvieron las relaciones agua/cemento.

El análisis realizado, busca brindar una herramienta capaz de cuantificar el incremento en costos de producir con un agregado distinto al que se usa actualmente en cada ciudad. Para ello, se costearon los diseños con los que se producen en cada ciudad según relación a/c, siendo estos el punto de referencia. Por otro lado, se costeo el valor de otros diseños de mezcla en estas mismas ciudades que usan otras alternativas de agregados disponibles. Los costos de las

alternativas por ciudad se normalizaron respecto al costo de la condición local. Esto permite evaluar el impacto en términos de costo/beneficio ya que la información es presentada respecto a la resistencia promedio obtenida a los 28 días.

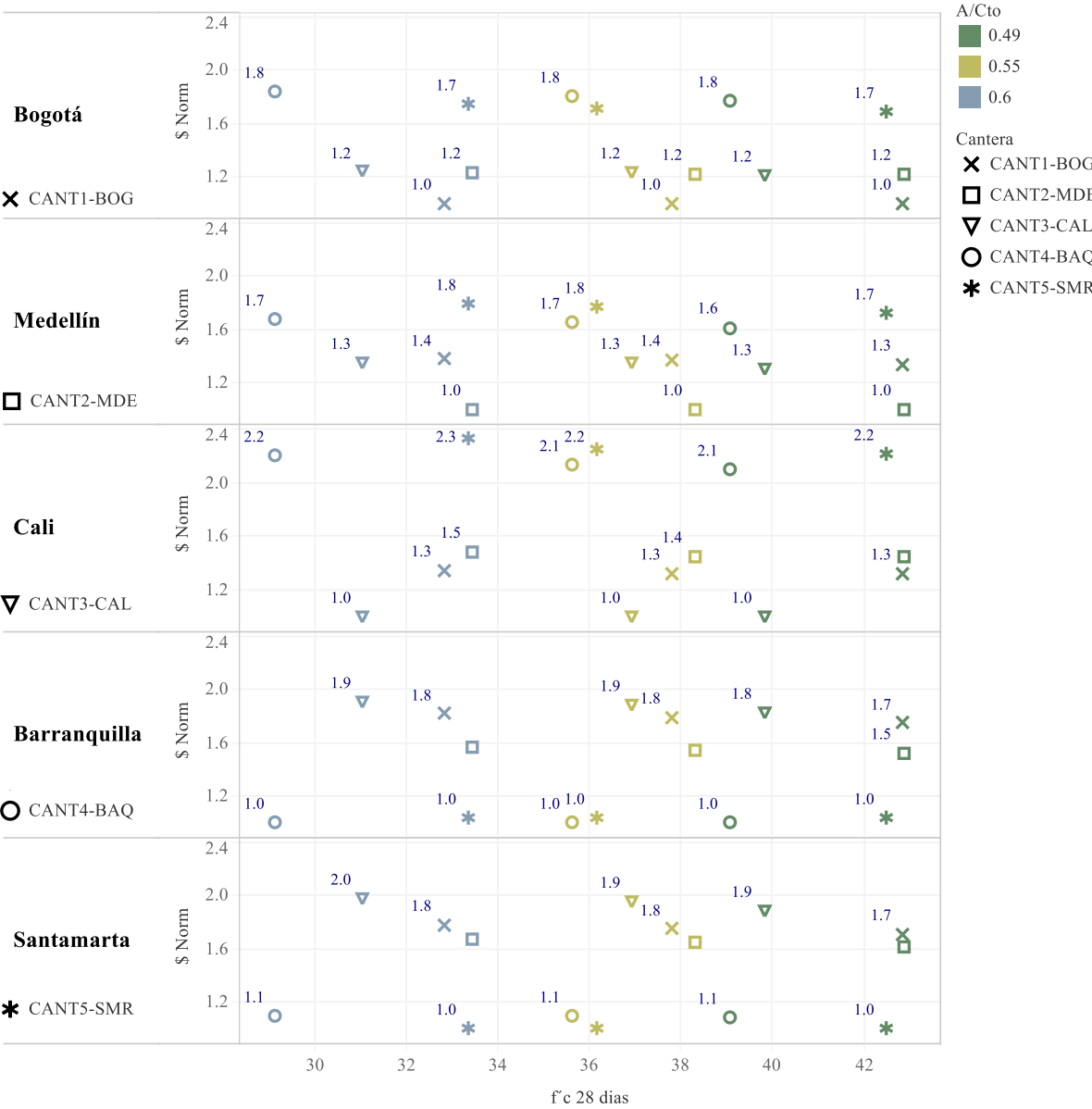


Figura 8-13 costos normalizados de materias primas para la producción de concretos por resistencias, realizado con materiales provenientes de diferentes canteras respecto al costo de producción con la cantera local, evaluado para tres relaciones a/c.

La Figura 8-13 presenta el costo de producción respecto a la alternativa local, por tipo de agregado y relación a/c. En la figura, las diferentes canteras del país se representan con diferentes formas de los marcadores, y la relación a/c con diferentes colores. Por ejemplo, para el caso de la ciudad de Barranquilla, el agregado local corresponde al de la cantera 4 representado con círculos, que junto al color de cada marcador presentan la resistencia obtenida para las diferentes relaciones a/c, los demás marcadores presentados por ciudad representan la relación de costos de producción con cada agregado respecto al costo de producción local.

Las mayores resistencias producidas con el agregado local se presentan en la ciudad de Medellín, de manera no es conveniente llevar agregado de otra ciudad ya que incrementa los costos de producción y no genera un beneficio en la resistencia. Caso contrario al de Cali donde el concreto producido con los agregados de la cantera local entregan resultados no tal altos, presentando las alternativas de mayores resistencias para la misma relación a/c producidas con agregados de otras canteras con su incremento asociado en costos, como el caso de la cantera usada para Bogotá que para la relación a/c de 0.6 entrega un desempeño superior de 2 MPa respecto a la condición local con costo de 1.3 veces los de producción local.

Un resultado interesante es el que se presenta en la ciudad de Barranquilla, donde se produce con el agregado de menor desempeño en resistencia, de manera que las demás alternativas propuestas con los otros agregados presentan un mejor desempeño, como el caso de los agregados de la cantera 5 usados en Santa Marta que para la relación a/c de 0.6 entregan 3 MPa adicionales de desempeño a un costo de producción muy similar, siendo esta una alternativa para optimizar los costos de materia prima en la producción de concreto, cuya implementación estará sujeta a la capacidad de producción por parte del proveedor.

## 8.4 Módulo de elasticidad del concreto

A lo largo de esta investigación se realizaron más de 250 ensayos de módulo de elasticidad a distintos concretos, variando las relaciones agua/cemento (0.35, 0.49, 0.55 y 0.6), distintas edades (7, 28 y 56 días), la fuente del agregado y condiciones especiales.

La Figura 8-14 presenta el espectro de los módulos de elasticidad ( $E_c$ ) respecto a la resistencia a la de todos los grupos (representados en escala de grises), agregados (representados por una figura única). Se observa que la pendiente de proporcionalidad de  $E_c$  en los concretos de alta no incrementa en la misma proporción en la que lo hacen las resistencias a la compresión, como lo hacen los del grupo convencional, lo que indica que el análisis de este parámetro debe realizarse por partes como se evidencio en la revisión de literatura, como es el caso de la (ACI 363, 1997) donde se plantea una ecuación distinta para el cálculo del módulo de elasticidad de los concretos de alta resistencia con valores esperados menores, respecto a la ecuación planteada para los concretos convencionales presentada en la (ACI 318, 2014). A lo largo de este capítulo se presentarán los resultados de  $E_c$ , para los distintos grupos de concretos, fuentes y condiciones especiales, estableciendo relaciones con los parámetros evaluados.

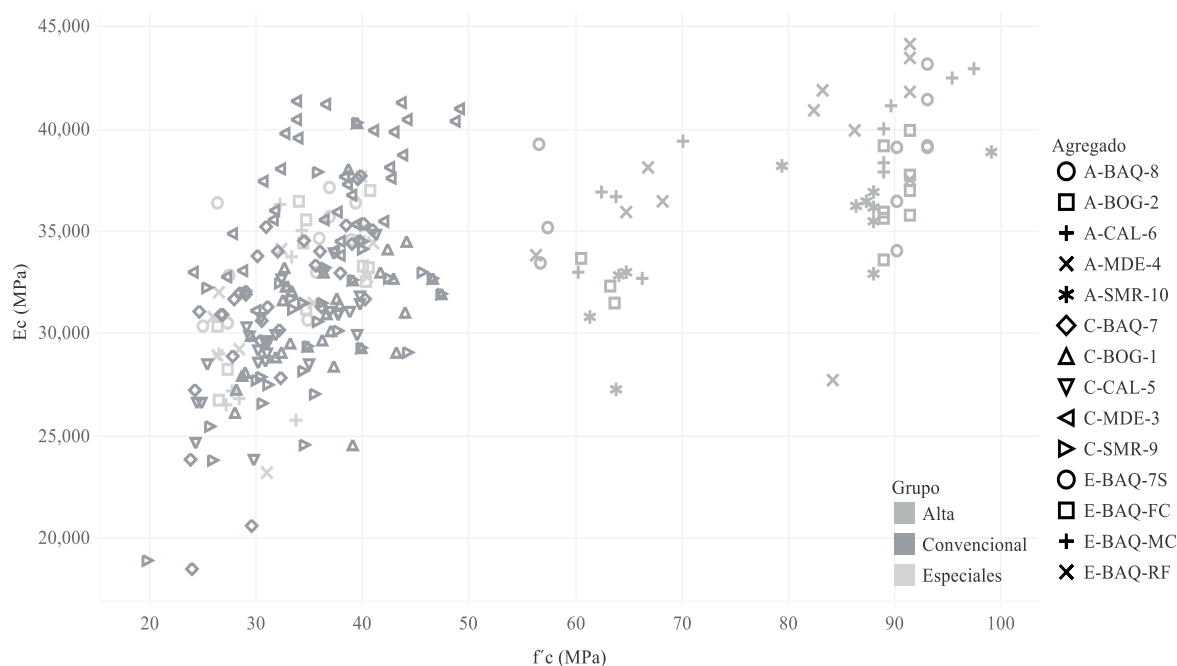


Figura 8-14 Módulos de elasticidad  $E_c$  para todas las resistencias a la compresión  $f'c$  obtenidas por grupo y tipo de diseño, a distintos tamaños de agregado, edades y relaciones a/c.

Dentro de la revisión de la literatura realizada para esta investigación, la mayoría de los modelos para estimar el módulo de elasticidad están asociados a las propiedades del concreto, llegando al detalle de las proporciones de cada constituyente y sus propiedades mecánicas. Sin embargo, para un diseñador estructural, o ingeniero de obra, esta información no es necesariamente de fácil acceso, por lo que se prefiere siempre generar correlaciones con

la menor cantidad de parámetros y con valores de fácil acceso. Es por ello, que la mayoría de las relaciones para el módulo de elasticidad en los distintos códigos de construcción (ACI 318, 2014) (NSR-10, 2010) (BS-5400-4, 1990) (FHWA, 2000b) se presenta como se muestra en la ecuación ( 7 ), mediante un factor  $\alpha$  ( $\alpha$ ) que multiplica la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión y un intercepto, que típicamente se hace igual a cero.

$$E_c = \alpha \sqrt{f'_c} + C \quad (7)$$

El módulo de elasticidad del concreto se midió bajo las condiciones establecidas en el capítulo anterior y los resultados se presentan en la Figura 8-15, en la cual el eje Y corresponde a todos los resultados de módulo de elasticidad, correlacionados con la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión obtenida, los resultados de los concretos convencionales se encuentran entre los 19,000 MPa y los 41,000 MPa, mostrando agrupaciones y tendencias por tipo de agregado. Los diseños especiales se encuentran en el mismo rango de los resultados obtenidos para el agregado de referencia #8. Por su parte, los diseños de alta no muestran un aumento considerable en los módulos de elasticidad.

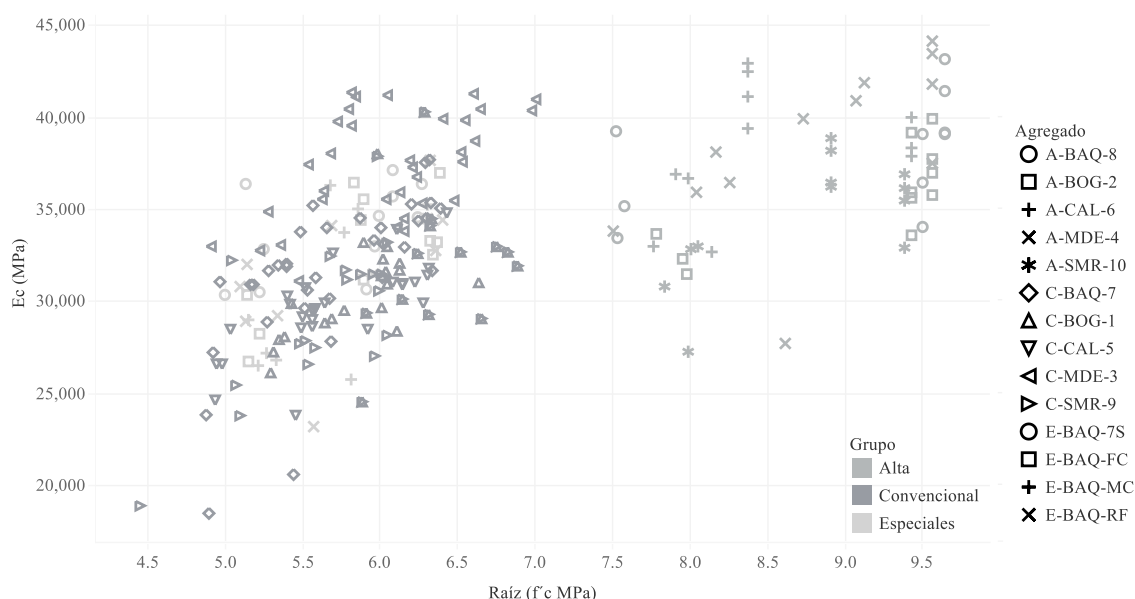


Figura 8-15. Espectro de resultados de módulo de elasticidad respecto a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión a las distintas edades, agregados y criterios de diseño de esta investigación.

Dado el esquema para la fórmula de módulo elástico presentado en ecuación ( 7 ), se realizó el ajuste lineal para cada tipo de agregado, cuyos coeficientes  $\alpha$  se presentan para cada uno. La Figura 8-16 presenta los resultados de las regresiones hechas con 175 datos obtenidos de los ensayos con los 5 agregados empleados en los concretos convencionales, la figura presenta  $E_c$  versus  $\sqrt{f'_c}$ , de manera que la pendiente de esta correlación lineal corresponde al valor  $\alpha$ , con el que se puede predecir o explicar el comportamiento esperado de módulo de elasticidad de un concreto a partir de la resistencia a la compresión. Se presenta además la

desviación estándar de la distribución muestral (StdErr), el valor t y el límite inferior de la pendiente con un 95% de confianza. Esta figura está ordenada de manera descendente respecto al valor de  $\alpha$ , mostrando que el agregado 3 es el que mayor desempeño aporta en el módulo de elasticidad con un  $\alpha = 6,172$ . El modelo con menor dispersión es el presentado con el agregado # 5 con un  $\alpha = 5,196$  y con un error estándar de 52.4 MPa, que es la diferencia promedio entre lo estimado y lo medido; lo cual no representa un mayor módulo de elasticidad, sino mayor precisión en los resultados. De manera general los límites para los agregados evaluados se encuentran entre  $5,119 \leq \alpha \leq 6,172$ , con la mayor concentración de los resultados cercano a un  $\alpha = 5,100$ , siendo mayor al valor usado actualmente en Colombia con un  $\alpha = 4,700$  (NSR-10, 2010).

Dada la dispersión de los resultados para todos los casos se presenta el valor de  $\alpha$  con un nivel de confianza del 95%, reduciendo los valores de módulo de elasticidad estimados encontrándose en un rango de entre  $4,940 \leq \alpha \leq 6,012$ , con mayor concentración en  $\alpha = 4,950$ .

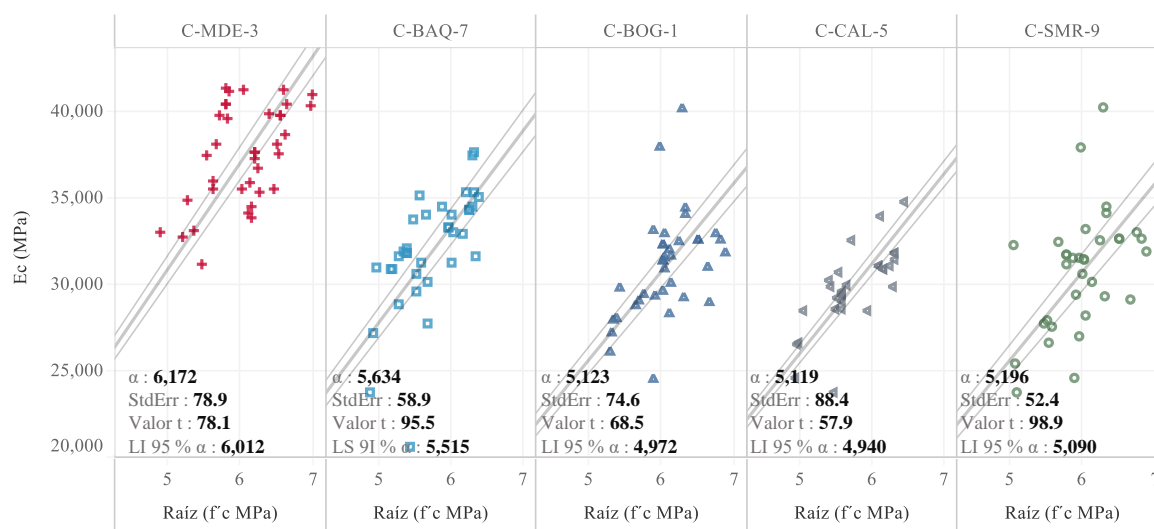


Figura 8-16 Regresión lineal con intercepto en 0 para los diseños realizados con los agregados para concretos convencionales, en las distintas relaciones agua/cemento a diferentes edades ensayadas.

La Tabla 8-1 presenta el análisis de discordancia de las 175 probetas realizadas con distintos agregados, arrojando un valor p muy inferior al 0.05 establecido, de manera que cada agregado si debe analizarse de manera independiente. Los resultados de módulo de elasticidad obtenidos reflejan este comportamiento esta asociado a la fuente con la que se produce y no a la variabilidad propia de los ensayos, los resultados estadísticos de cada modelo se presentan en la Tabla 8-2.

Tabla 8-1 Análisis de discordancia entre todos los agregados de los concretos convencionales, del módulo de elasticidad respecto a la raíz de la resistencia a la compresión.

<u>Field</u>	<u>DF</u>	<u>SSE</u>	<u>MSE</u>	<u>F</u>	<u>Valor p</u>
Agregado	4	1.066404e+09	2.66601e+08	35.0822	< 0.0001

Tabla 8-2 Estadísticos de las líneas de tendencia entre todos los agregados de los concretos convencionales.

Paneles		Línea		Coeficientes				
Fila	Columna	valor p	DF	Término	Valor	StdErr	valor t	valor p
Ec (MPa)	C-MDE-3	< 0.0001	36	$\sqrt{f'_c}$	6172	79.0	78.2	< 0.0001
Ec (MPa)	C-BAQ-7	< 0.0001	34	$\sqrt{f'_c}$	5635	59.0	95.5	< 0.0001
Ec (MPa)	C-BOG-1	< 0.0001	35	$\sqrt{f'_c}$	5123	74.7	68.6	< 0.0001
Ec (MPa)	C-SMR-9	< 0.0001	34	$\sqrt{f'_c}$	5120	88.4	57.9	< 0.0001
Ec (MPa)	C-CAL-5	< 0.0001	29	$\sqrt{f'_c}$	5197	52.5	99.0	< 0.0001

La Figura 8-17 presenta los resultados de la regresión los diseños del grupo de alta resistencia, estos fueron realizados con materiales de las mismas canteras evaluadas anteriormente, con agregado de menor tamaño (TMN ½”) capaz de garantizar un mejor en desempeño de las propiedades mecánicas. Al igual que los diseños convencionales, el agregado que presenta mayores módulos de elasticidad es el usado en Medellín, con una disminución de la pendiente arrojando un  $\alpha = 4,463$ , el mayor cambio se presenta en el agregado usado en Cali, que pasa de ser el cuarto en desempeño de los diseños convencionales, a ser el segundo agregado con mejor desempeño en los concretos de alta resistencia, muy cercano al agregado de Medellín, este comportamiento se podría presentar debido a la necesidad de reducir el tamaño, en la que sufre un proceso mecánico que es capaz de aumentar la cantidad de caras fracturadas, disminuir el desgaste del material y amentar la superficie de contacto con la matriz del concreto.

Esta figura está ordenada de manera descendente respecto al valor de  $\alpha$ , mostrando que el agregado 4 es el que mayor desempeño aporta en el módulo de elasticidad con un  $\alpha = 4,463$ , presentando la menor dispersión con un error estándar de 63.8 MPa, que es la diferencia promedio entre lo estimado y lo medido. De manera general los límites para los agregados evaluados se encuentran entre  $3,928 \leq \alpha \leq 4,463$ , con la mayor concentración de los resultados cercano a un  $\alpha = 4,000$ , siendo menor al valor usado actualmente en Colombia con un  $\alpha = 4,700$  (NSR-10, 2010), donde no se posee una ecuación que estime el comportamiento de los concretos de alta resistencia.

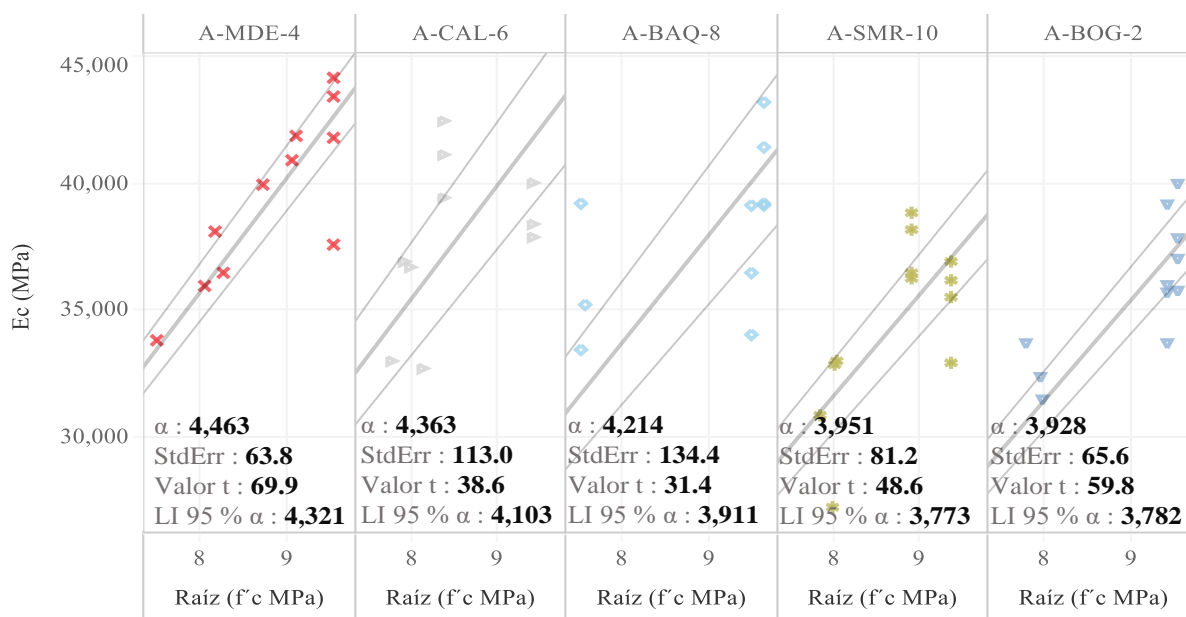


Figura 8-17 Regresión lineal con intercepto en 0 para los diseños realizados con los agregados usados para los concretos de alta resistencia, en las distintas relaciones agua/cemento a las diferentes edades ensayadas.

La Tabla 8-3 presenta el análisis de discordancia de las 53 probetas realizadas con los distintos agregados, arrojando un valor p inferior al 0.05 establecido, de manera que, cada agregado si debe analizarse de manera independiente, puesto que los resultados de módulo de elasticidad obtenidos reflejan que están asociados a la fuente con la que se produce y no a la variabilidad propia de los ensayos, la Tabla 8-4 presenta los estadísticos asociados a los modelos propuestos para cada agregado.

Tabla 8-3 Análisis de discordancia entre todos los agregados de los concretos de alta, del módulo de elasticidad respecto a la raíz de la resistencia a la compresión.

Field	DF	SSE	MSE	F	Valor p
Agregado	4	1.98E+08	4.94E+07	6.97088	0.0002

Tabla 8-4 Líneas de tendencia entre todos los agregados de los concretos convencionales, del módulo de elasticidad respecto a la raíz de la resistencia a la compresión.

Fila	Paneles Columna	Línea		Término	Coeficientes			
		valor p	DF		Valor	StdErr	valor t	valor p
Ec (MPa)	A-MDE-4	< 0.0001	10	$\sqrt{f'c}$	4463.4	63.844	69.911	< 0.0001
Ec (MPa)	A-CAL-6	< 0.0001	8	$\sqrt{f'c}$	4363.8	113.01	38.613	< 0.0001
Ec (MPa)	A-BAQ-8	< 0.0001	9	$\sqrt{f'c}$	4214.2	134.02	31.444	< 0.0001
Ec (MPa)	A-SMR-10	< 0.0001	11	$\sqrt{f'c}$	3951.9	81.241	48.645	< 0.0001
Ec (MPa)	A-BOG-2	< 0.0001	10	$\sqrt{f'c}$	3928.4	65.635	59.853	< 0.0001



La Figura 8-18 presenta  $E_c$  versus  $\sqrt{f'_c}$ , de los concretos especiales. No se observan variaciones considerables en los resultados obtenidos para los diseños E-BAQ-FC, EBAQ-RF y E-BAQ-MC con un promedio de la pendiente ( $\alpha$ ) de 5,550, valor muy cercano al obtenido en los diseños realizados con el agregado #7 del grupo de diseños convencionales C-BAQ-7 con un valor de 5,600, ratificando la repetibilidad de la información y dando solidez a los resultados obtenidos. La Tabla 8-5 presenta los resultados del análisis de discordancia, arrojando que el valor p es superior al 0.05, de manera que los resultados obtenidos para cada característica pueden asociarse a la variabilidad del ensayo y no por la influencia de las propiedades evaluadas, de manera que no hay evidencia para definir que las características especiales en lo diseños modifican los resultados  $E_c$ .

Los diseños evaluados se realizaron con una sola relación agua/cemento, razón por la que se tienen menos datos que los obtenidos para los agregados de los diseños convencionales, siendo esta una razón por la que las desviaciones de los modelos son más altas con un promedio de 142 respecto a los 95.5 obtenidos en la regresión del agregado #7 la cual contiene el triple de datos.

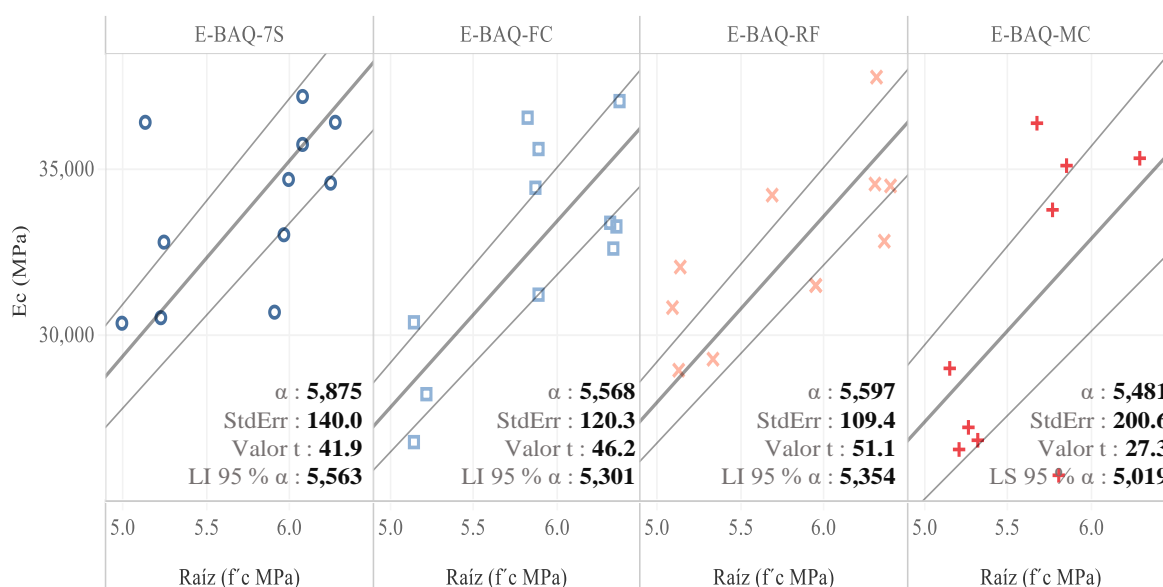


Figura 8-18 Regresión lineal con intercepto en 0 para los diseños realizados con los agregados usados para los concretos especiales, en las distintas relaciones agua/cemento a las diferentes edades ensayadas.

Tabla 8-5. Análisis de discordancia entre todos los agregados de los concretos especiales, del módulo de elasticidad respecto a la raíz de la resistencia a la compresión.

Field	DF	SSE	MSE	F	Valor p
Agregado	3	29848169	9.95E+06	1.44151	0.2459

Cabe resaltar que Se observa un incremento en los diseños E-BAQ-7S a los que se le adicionó la micro sílice al 7%, obteniendo un valor de 5,875 correspondiente a un incremento del 5% respecto a los demás diseños. El análisis de discordancia anterior, ser realizo para los 4 diseños especiales con un valor P de 0.245, al realizar el mismo análisis sin los resultados de esta característica, el valor P alcanza 0.959 ratificando que no hay diferencia en los resultados obtenidos para las características E-BAQ-FC, EBAQ-RF y E-BAQ-MC y que la influencia la micro sílice no es estadísticamente suficiente para modificar esta propiedad del concreto.

Tabla 8-6 Líneas de tendencia entre todos los agregados de los concretos especiales, del módulo de elasticidad respecto a la raíz de la resistencia a la compresión.

Paneles Fila	Columna	Línea valor p	DF	Coeficientes				
				Término	Valor	StdErr	valor t	valor p
Ec (MPa)	E-BAQ-7S	< 0.0001	10	$\sqrt{f'_c}$	5875	140.07	41.945	< 0.0001
Ec (MPa)	E-BAQ-FC	< 0.0001	10	$\sqrt{f'_c}$	5568.9	120.34	46.278	< 0.0001
Ec (MPa)	E-BAQ-RF	< 0.0001	10	$\sqrt{f'_c}$	5597.7	109.48	51.13	< 0.0001
Ec (MPa)	E-BAQ-MC	< 0.0001	8	$\sqrt{f'_c}$	5481.4	200.68	27.314	< 0.0001

La Figura 8-19 presenta todo el espectro de resultados del módulo elástico de todas las muestras por tipo de diseño. Se observan diferencias claras de las tendencias según agregado y grupo de concretos (convencional o de alta), resaltando la importancia de conocer las características de los materiales usados para la producción de concreto al momento de estimar su comportamiento.

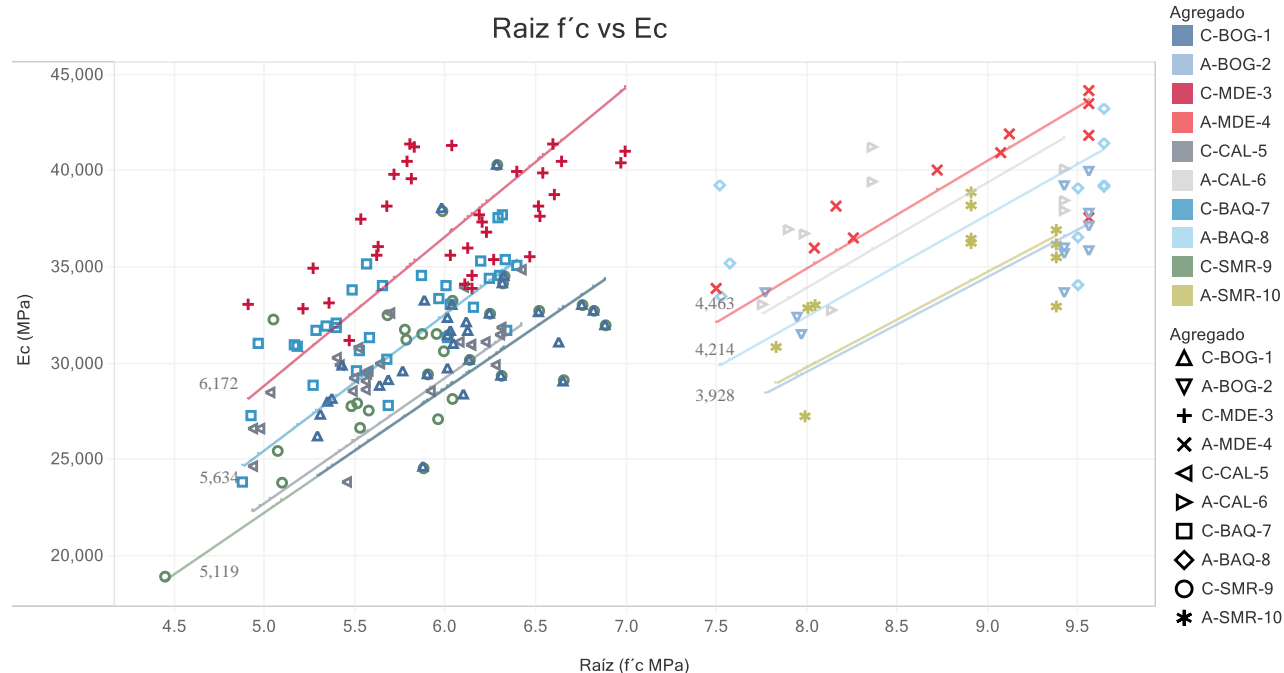


Figura 8-19 Coeficiente  $\alpha$ , para la ecuación de módulo de elasticidad por agregado, en las distintas relaciones agua/cemento y edades de ensayo.

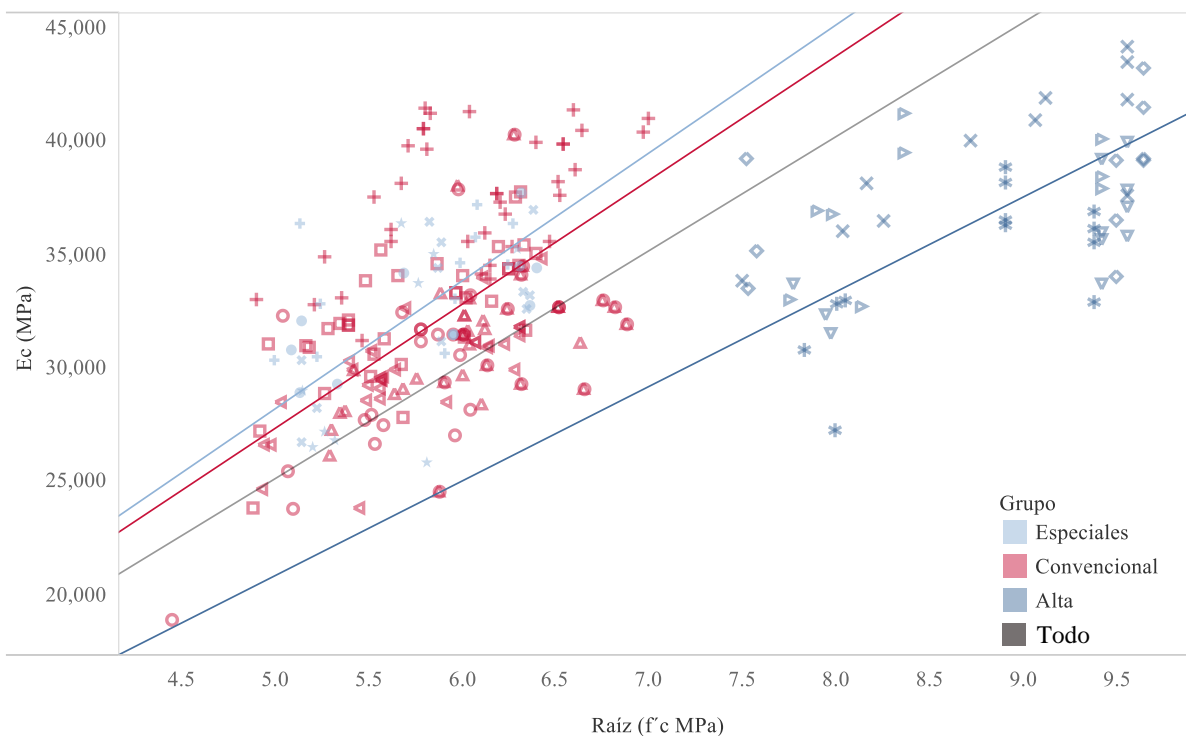


Figura 8-20 Coeficiente  $\alpha$ , para la ecuación de módulo de elasticidad por grupo de diseños, en las distintas relaciones agua/cemento y edades de ensayo.

Mientras que la Figura 8-20 presenta la pendiente para las diferentes agrupaciones de diseños y la Tabla 8-7 presenta los valores de  $\alpha$  para las regresiones, los de alta arrojaron para los diferentes agregados  $\alpha = 4,200$ , los especiales  $\alpha = 5,650$ , convencionales  $\alpha = 5,500$  y un valor que representa a todos con  $\alpha = 5,000$ .

Tabla 8-7 Líneas de tendencia de los grupos de diseños, del módulo de elasticidad respecto a la raíz de la resistencia a la compresión.

Fila	Columna	Grupo	DF	Término	Valor $\alpha$	StdErr	valor t	valor p	LI $\alpha$ 95%
Ec (MPa)	$\sqrt{f'_c}$	Alta	52	$\sqrt{f'_c}$	4,169	49.815	83.692	< 0.0001	4,069
Ec (MPa)	$\sqrt{f'_c}$	Convencional	172	$\sqrt{f'_c}$	5,466	45.88	119.15	< 0.0001	5,376
Ec (MPa)	$\sqrt{f'_c}$	Especiales	41	$\sqrt{f'_c}$	5,638	71.365	79.012	< 0.0001	5,495
Ec (MPa)	$\sqrt{f'_c}$	Todos	267	$\sqrt{f'_c}$	5,023	50.069	100.33	< 0.0001	4,925

La Figura 8-21 presenta el gráfico de residuos para los módulos de elasticidad respecto a los distintos modelos presentados anteriormente; la primera fila representa los residuos evaluados respecto al modelo propio de cada agregado, de manera, que se observa que no hay una tendencia en los residuos y que se distribuyen de forma Normal. Cuando se evalúan los resultados respecto al modelo creado con toda la información, la mayoría de los residuos de los diseños convencionales se encuentran en la parte positiva denotando mayores resultados a los propuestos por el modelo, mientras, que los diseños de alta se encuentran en la parte negativa reflejando valores menores a los del modelo. Se hace necesario tener modelos independientes para cada grupo de diseños capaz de reducir el error de las estimaciones.



Figura 8-21 Residuos del módulo elasticidad respecto a los distintos modelos presentados; el modelo de cada agregado, el modelo para todos los agregados, los convencionales y el modelo para los diseños de alta.

En la práctica profesional no es fácil conocer al detalle las materias primas con las que se elabora el concreto, en la mayoría de los casos el criterio de venta es el precio, la resistencia a 28 días y el asentamiento; mientras que el módulo de elasticidad es solo un criterio de segundo o tercer orden en la selección del producto, ya que este se asume altamente correlacionado con  $f'_c$  sin importar el tipo de agregado. En las secciones anteriores se demostró que las variaciones de módulo pueden ser del orden 18% entre mezclas con la misma relación a/c pero diseñadas con diferentes agregados.

Tabla 8-8 Propuesta del coeficiente  $\alpha$  promedio y con una confiabilidad del 95%, para la ecuación de módulo de elasticidad por grupo de diseño.

Grupo	$\alpha$	LI $\alpha$ 95%
Alta	4,200	4,100
Convencional	5,500	5,400
Especiales	5,600	5,500
Todos	5,000	4,900

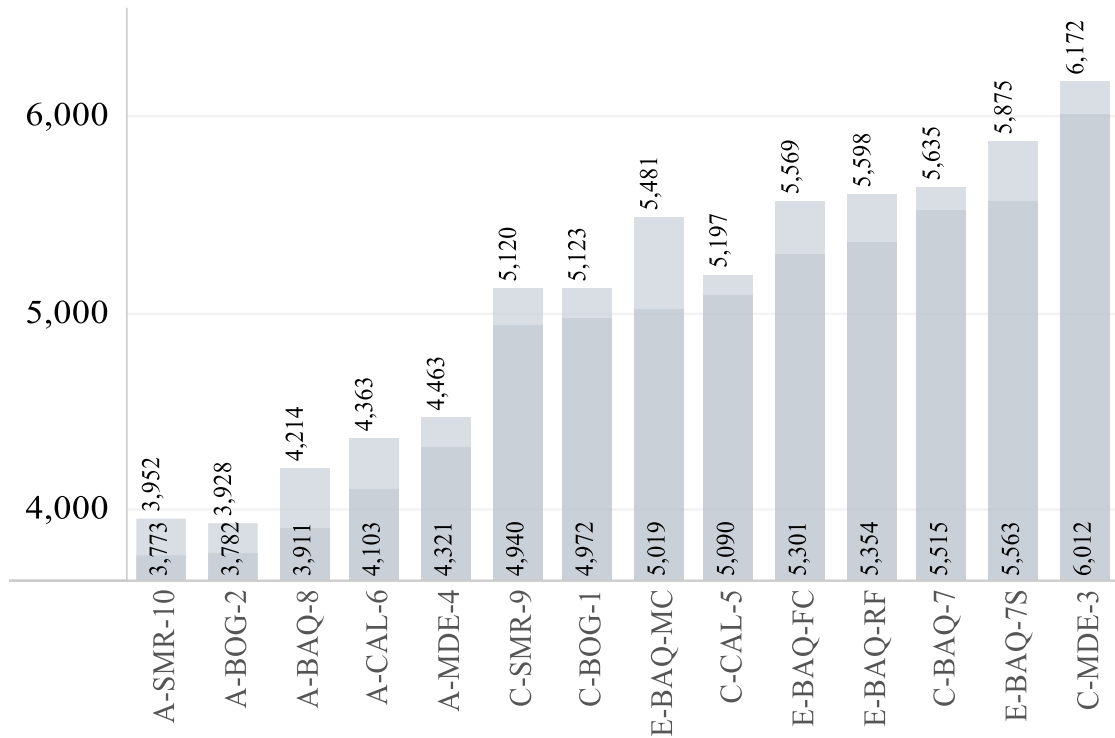


Figura 8-22. Coeficiente  $\alpha$  promedio y con una confiabilidad del 95%, para la ecuación de módulo de elasticidad para cada agregado y diseños especiales.

Como se presenta en la Figura 8-22, cada agregado presenta un valor  $\alpha$  distinto, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10, 2010) presenta diferentes ecuaciones para estimar el módulo de elasticidad del concreto, agrupándolos por el origen del material, siendo los de origen ígneo ( 8 ) los que entregarían un mayor módulo de elasticidad y los sedimentarios los de menores prestaciones ( 10 ). Con las petrografías realizadas a los agregados y presentadas en la Figura 8-4, se categorizaron todos los agregados según el origen del cual era el mayor porcentaje de sus partículas que se observa en la Tabla 8-9.

NSR-10	Origen Ígneo	$E_c = 5,500 \sqrt{f'c}$	( 8 )
--------	--------------	--------------------------	-------

NSR-10	Origen Metamórfico	$E_c = 4,700 \sqrt{f'c}$	( 9 )
--------	--------------------	--------------------------	-------

NSR-10	Origen Sedimentario	$E_c = 3,600 \sqrt{f'c}$	( 10 )
--------	---------------------	--------------------------	--------

NSR-10	Media experimental	$E_c = 3,900 \sqrt{f'c}$	( 11 )
--------	--------------------	--------------------------	--------

Tabla 8-9. Agrupación de agregados por origen.

Origen	Agregado
Ígneo	1 – 3 – 5
Metamórfico	9
Sedimentario	8

Al analizar los resultados del histograma presentado en la Figura 8-23, se observa que los agregados ígneos tienen presencia a lo largo de todo el histograma cobijando todo el espectro de las lecturas obtenidas, por lo que, para las condiciones y agregados evaluados en esta investigación no es posible afirmar que todos los agregados de origen ígneo tendrán el mayor módulo de elasticidad, es por ello que para poder predecir el comportamiento de un concreto se debe tener información previa de los constituyentes a usar y no afirmar que el origen de la grava establecerá el comportamiento final del elemento.

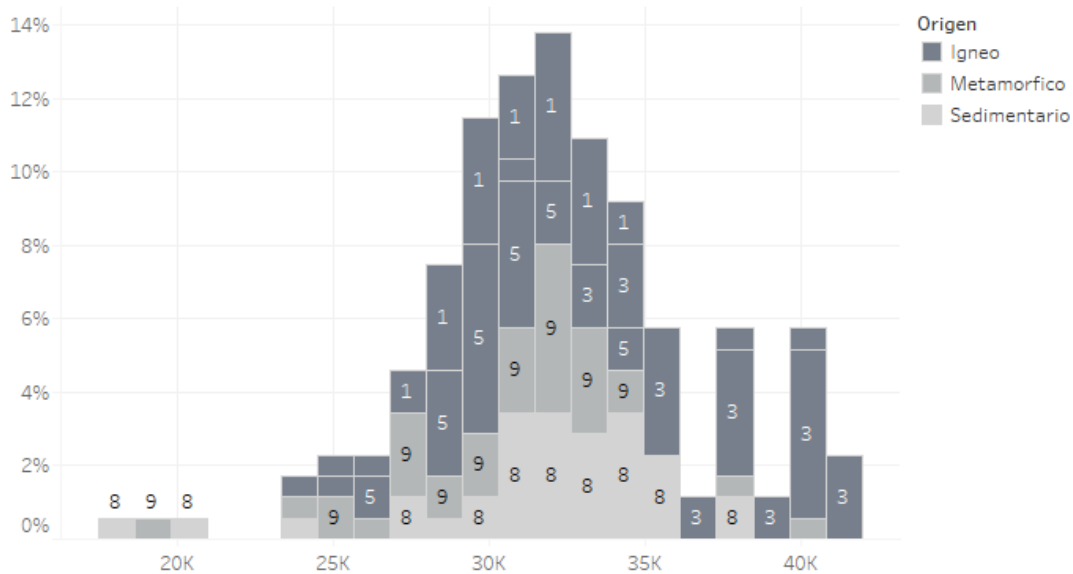


Figura 8-23. Módulos de elasticidad por origen del material y la identificación del agregado.

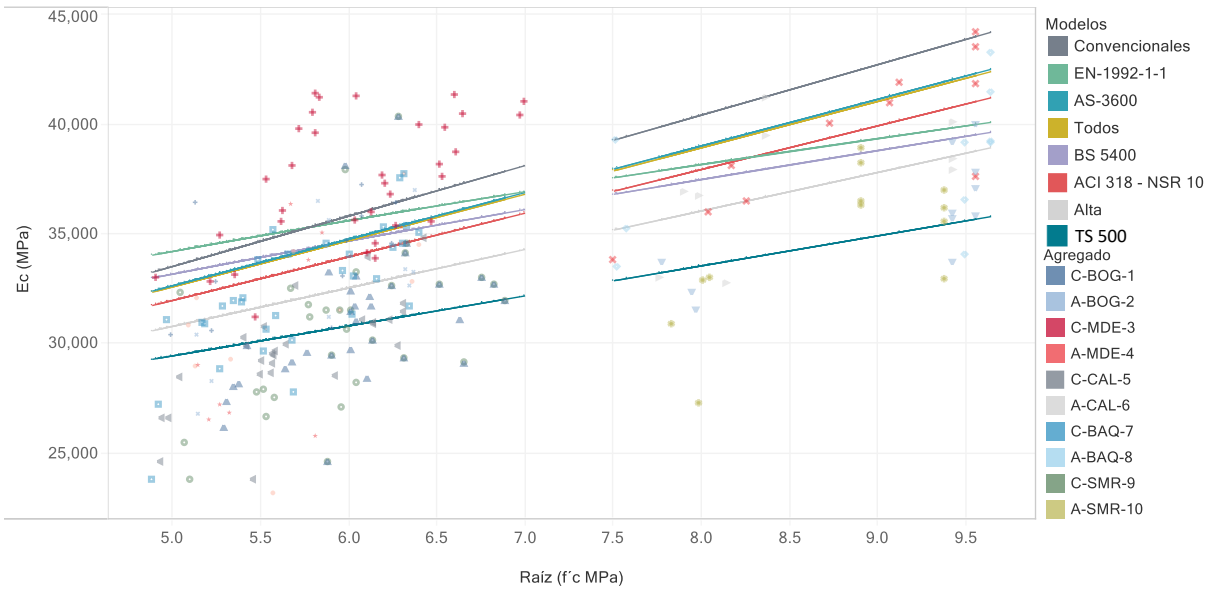


Figura 8-24 Comparación entre los modelos propuestos por grupo de agregados con los códigos internacionales.

Con la finalidad de evaluar los resultados obtenidos, la Figura 8-24 compara los valores de códigos de diseños internacionales con los modelos propuestos para los grupos de diseños, presentando los que presentan valores cercanos a los resultados obtenidos y valores extremos como el caso de código turco (TS-500, 2000) que presenta valores más bajos a los obtenidos. Un comportamiento interesante es el entregado por el euro código (EN 1992-1-1, 2004), el cual posee un valor de intercepto distinto a 0, presentando un mejor ajuste para los concretos tanto convencionales como los de alta, mientras que el código australiano (AS-3600, 2009) presenta una ecuación muy similar a los resultados obtenidos para la agrupación de todos los resultados.



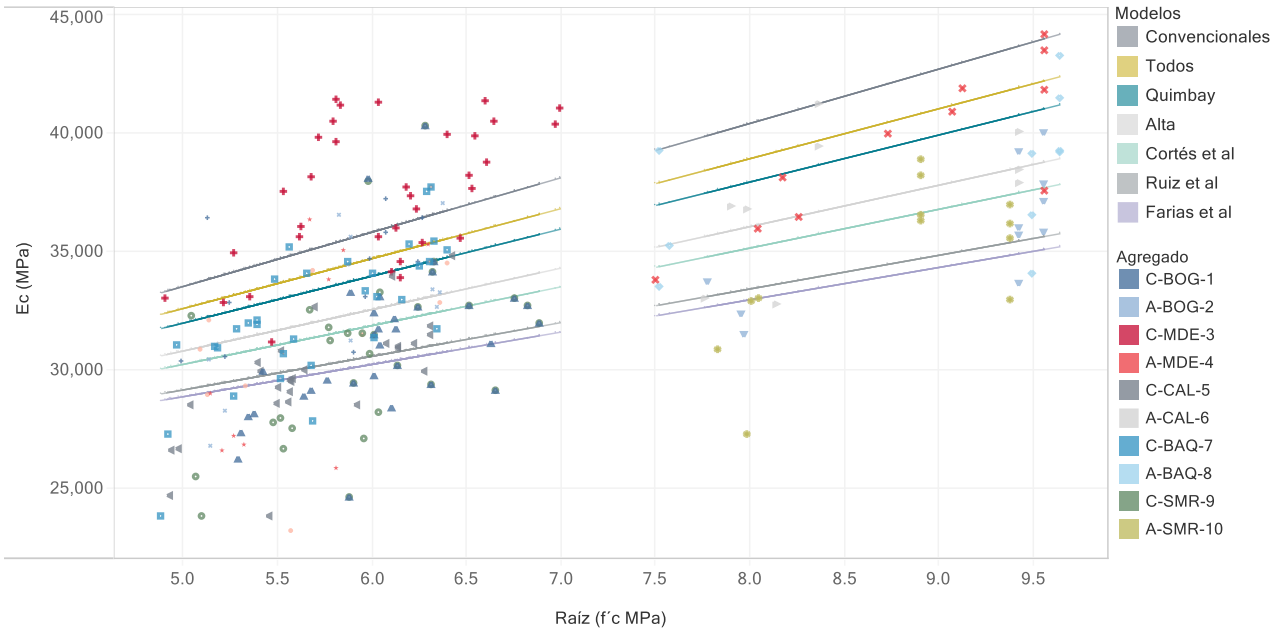


Figura 8-25 Comparación entre los modelos propuestos por grupo de agregados con los estudios previos realizados en Colombia.

La Figura 8-25 presenta los modelos definidos anteriormente por grupo de diseño, comparado con los modelos de los estudios realizados previamente en Colombia, presentando una diferencia notoria con valores mucho más bajos a los obtenidos en esta investigación, solo el resultado propuesto por (Qimbay, 2014) es el que se acerca con valor muy similar al de la (NSR-10, 2010).

La Figura 8-26 presenta la relación entre la densidad del concreto y los parámetros mecánicos mencionados como son la resistencia a la compresión  $f'_c$  y el módulo de elasticidad  $E_c$ . Se observa de manera general que a mayores densidades hay una tendencia de presentar mayores  $E_c$  y una relación menos marcada con las resistencias, esto al incremento en las cuantías de cemento el cual posee la mayor densidad, aumentando las propiedades mecánicas.

Los concretos evaluados se encuentran en un rango de densidades entre los 2,300 – 2,500 kg/m<sup>3</sup>, siendo los diseños C-MED-3 y C-BOG-1 los que presentan mayores densidades asociados a la densidad de los agregados que se utilizaron, estos se catalogan como agregados ígneos, que en las probetas arrojaron resistencias comparables, pero con valores del módulo de elasticidad considerablemente distantes. Los diseños C-BAQ-7, C-BOG-1 y C-SMR-9 presentan densidades cercanas con tendencias individuales de incremento en sus propiedades con el aumento de la densidad, pero de manera general se puede presentar un mismo modulo elástico para diferentes densidades.

De manera la densidad del concreto si entrega un indicio cuando se compara contra el mismo tipo de diseño, pero cuando se compara contra un diseño con materiales de origen distinto, este parámetro no es concluyente debido a la densidad propia de cada uno. Además,

este valor estará muy asociado a la colocación del concreto, donde la manera y el control con que se realice determinará su densidad.

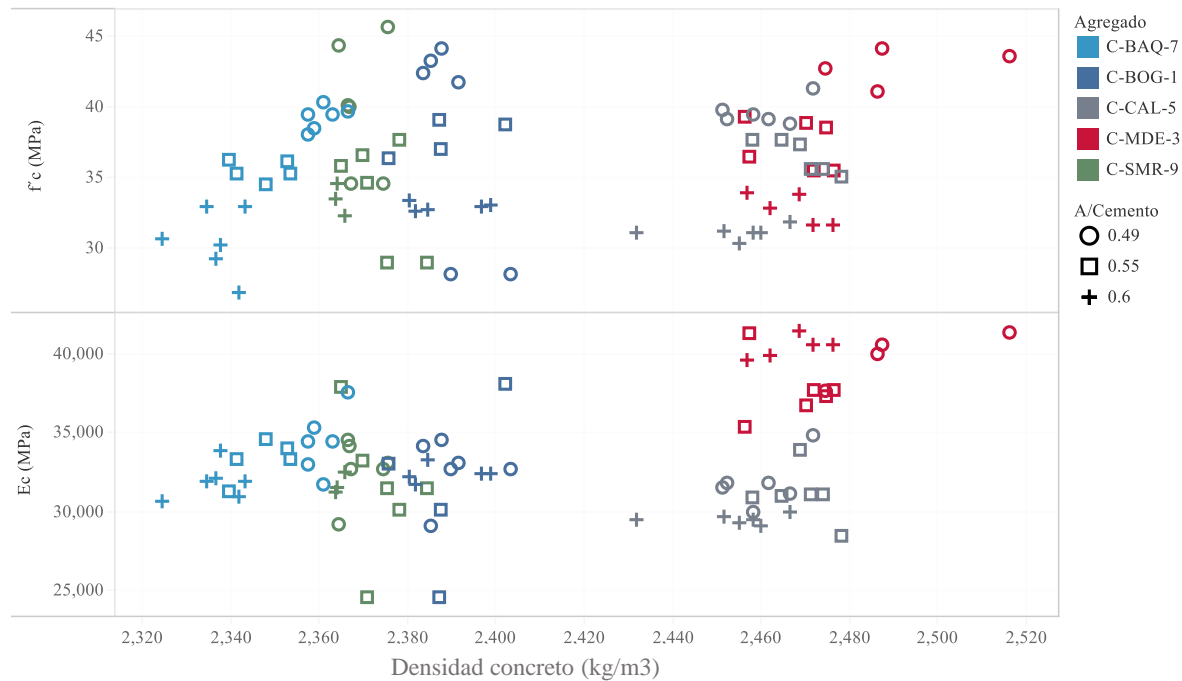


Figura 8-26. Influencia de la densidad en el módulo de elasticidad del concreto.

El ensayo de desgaste por máquina de los ángeles consiste en seleccionar una cantidad de material, con una gradación específica, el cual se coloca en un tambor metálico y se somete a cargas abrasivas por medio de esferas por un número establecido de ciclos. De manera, que se calcula el porcentaje de material que pasa el tamiz N°12 respecto a la masa inicial, denotando qué tanto sufrió el material frente a la acción de las esferas. Este ensayo presenta la pérdida de material frente a la abrasión, el cual es un indicador de la dureza de este. Esta dureza tiene cierta relación con la rigidez del agregado, es decir, a valores más bajos de desgaste, mayor es la dureza. La Figura 8-27 presenta la relación entre el desgaste de los cinco agregados usados para la elaboración de los concretos convencionales y el módulo de elasticidad. Se observa una correlación entre  $E_c$  y desgastes menores al 17%. Aunque este ensayo no permitiría estimar de manera lineal el módulo de elasticidad del concreto, si puede dar indicios sobre qué agregados, dentro de un grupo bajo análisis, generarían mayor módulo de elasticidad del concreto.

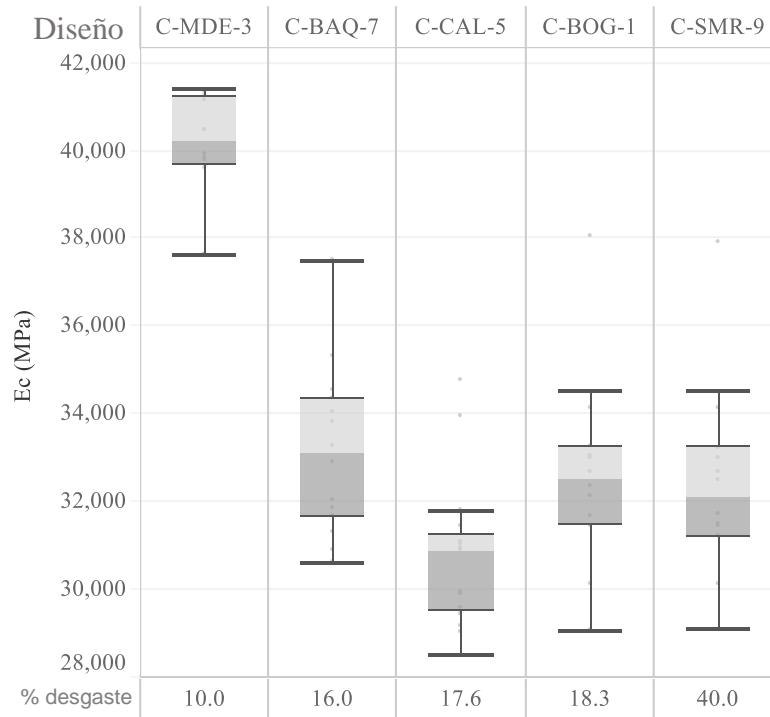


Figura 8-27. Influencia del desgaste del agregado en el módulo de elasticidad del concreto.

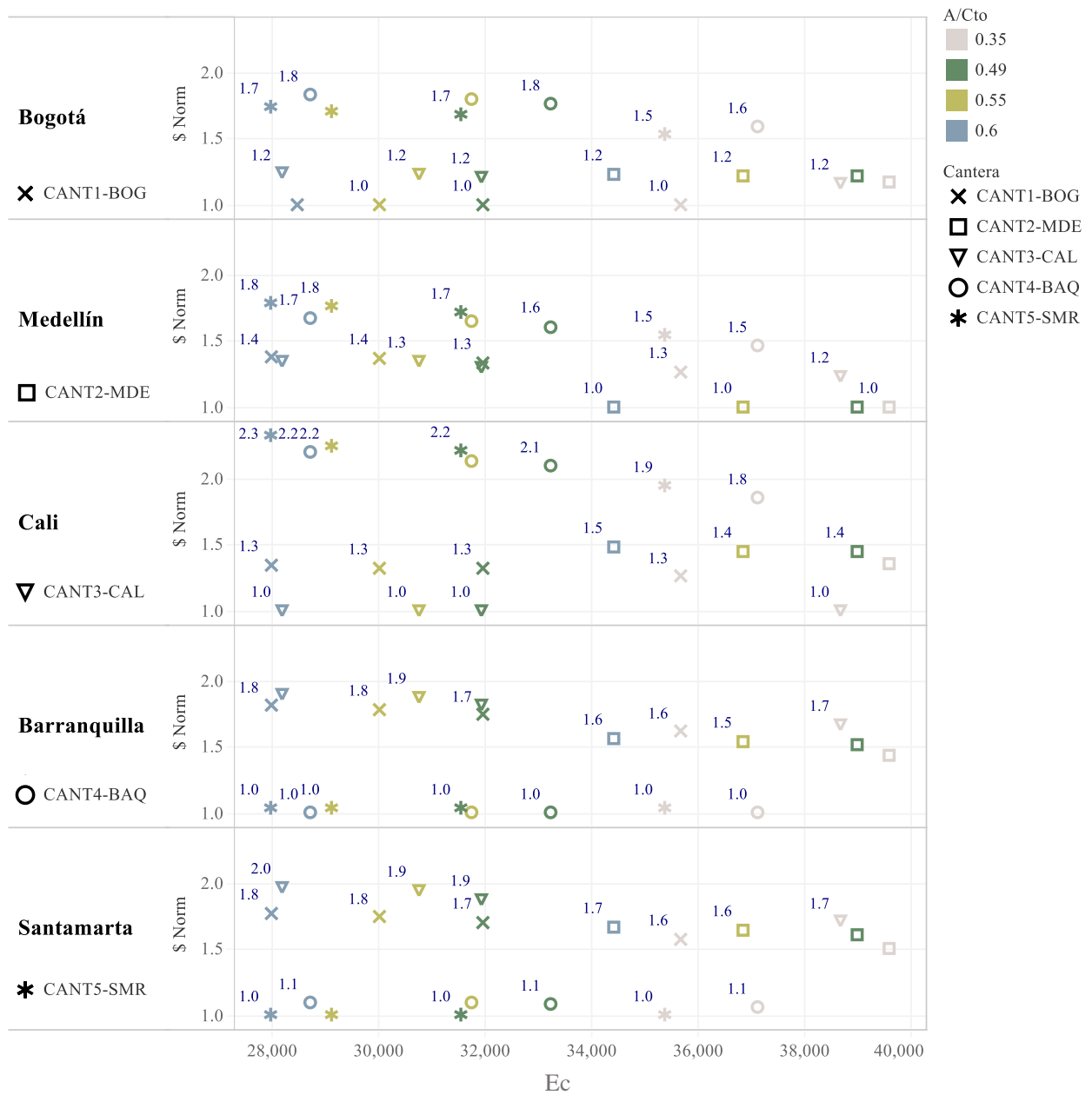


Figura 8-28 Relación de costos de materia prima de concreto con 4 relaciones agua/cemento, variando la cantera de origen del material en las diferentes ciudades evaluadas a lo largo del módulo de elasticidad.

La Figura 8-28 presenta el costo de producción respecto a la alternativa local, por tipo de agregado y relación a/c. En la figura, las diferentes canteras del país se representan con diferentes formas de los marcadores, y la relación a/c con diferentes colores. Por ejemplo, para el caso de la ciudad de Barranquilla, el agregado local corresponde al de la cantera 4 representado con círculos, que junto al color de cada marcador presentan el módulo de elasticidad obtenido para las diferentes relaciones a/c en los dos grupos analizados, los convencionales y los de alta ( $a/c = 0.35$ ), los demás marcadores presentados por ciudad representan la relación de costos de producción con cada agregado respecto al costo de producción local.

Los mayores módulos de elasticidad con el agregado local se presentan en la ciudad de Medellín, de manera no es conveniente llevar agregado de otra ciudad ya que incrementa los costos de producción y no genera un beneficio en este parámetro. Caso contrario al de Cali donde el concreto producido con los agregados de la cantera local entregan resultados no tal altos, presentando las alternativas de mayores módulos para la misma relación a/c producidas con agregados de otras canteras con su incremento asociado en costos. Para una relación  $a/c = 0.6$  como es el caso de la cantera 2 que es usado en la ciudad de Medellín con un incremento de 6,000 MPa alrededor del 20% respecto al agregado de Cali, con un costo de 1.5 veces la condición local.

Un resultado interesante es el que se presenta en la ciudad de Barranquilla, donde se produce con un agregado de buen modulo, de manera que las demás alternativas propuestas con los otros agregados presentan un menor desempeño con un sobrecosto asociado, excepto la cantera 2 que presenta un comportamiento distante a los demás. Dado el caso que se requiera un módulo de elasticidad mayor en la ciudad de Santa marta producir con la cantera 4, que se usa en la ciudad de Barranquilla es una de las alternativas más viables ya que para el caso de  $a/c = 0.55$  trabajar con esta cantera aumenta el módulo de elasticidad en 2,500 MPa cerca de un 9%, con costos muy similar al de la producción local, de manera que escoger el agregado correcto permitirá entregar soluciones a los clientes.

Es importante resaltar los resultados obtenidos con la  $a/c = 0.35$  de los concretos de alta resistencia, donde con cuantías altas cemento los módulos incrementan a una tasa más baja alcanzando valores altos, siguiendo asociados al agregado utilizado; para el caso de Santa Marta es posible llegar a los 35,000 MPa con las condiciones locales. Es aquí donde que es necesario evaluar que alternativa es mejor, si incrementar cuantías de cemento con posibilidad de fisuras por retracción y choque térmico debido al gran calor se libera en la hidratación (situación que se puede evitar con un buen control en obra), o traer agregados de otra cantera para alcanzar el resultado requerido en obras donde el control es más flexible.

## 8.5 Curvas de esfuerzo – deformación del concreto

Para el diseño estructural es importante conocer las propiedades constitutivas de los materiales. En el caso del concreto, es de interés conocer la curva de esfuerzo-deformación en compresión, la cual es rara vez descrita en la literatura por lo complejo de su captura. A lo largo de esta investigación se registraron las curvas de esfuerzo versus deformación para los diferentes cilindros ensayados. La Figura 8-29 presenta los resultados para las muestras realizadas con el agregado #3 de las mezclas C-MED-3 de sus tres relaciones a/c. Estas curvas se diferencian por el resultado a compresión obtenido, que para la relación a/c de 0.6 fue en promedio de 33.4MPa, para a/c de 0.55 de 38.31 MPa, y para a/c de 0.49 de 42.86 MPa. De las gráficas de cada muestra se seleccionó el valor de  $\epsilon_{c0}$  correspondiente a la deformación asociada al esfuerzo máximo  $f'_c$ .

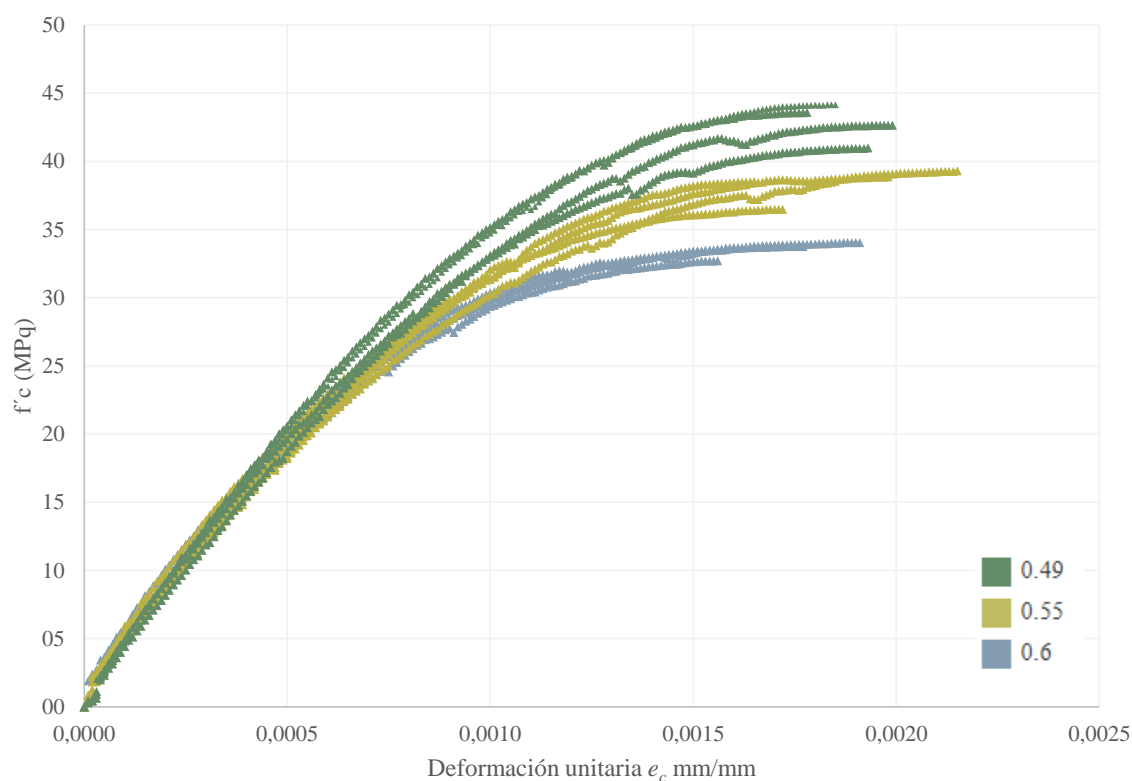


Figura 8-29. Curva de esfuerzo deformación para el agregado # 3 a 28 días con las tres relaciones a/c.

Los resultados obtenidos de  $\varepsilon_{c0}$  que se pueden describir de mejor manera con la función de densidad de probabilidad Lognormal con  $\sigma = 0.163$  y  $\mu = -6.261$  con un estadístico = 0.0405. La Figura 8-30 presenta los valores medidos de  $\varepsilon_{c0}$  para los tres grupos de diseño en todos sus agregados, mostrando un incremento marginal a medida que aumenta la resistencia para los de alta resistencia.

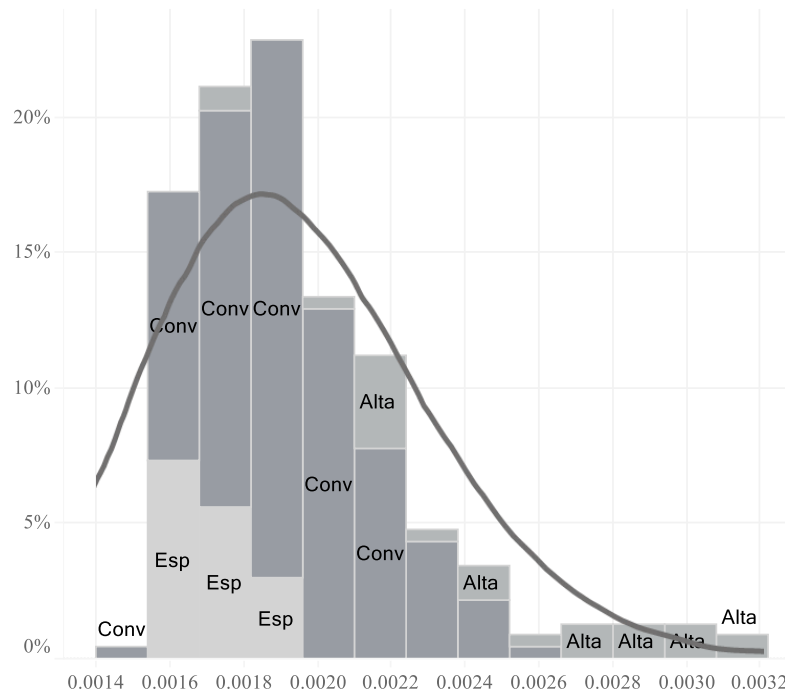


Figura 8-30. Registro de  $\varepsilon_{c0}$  para por grupo de concreto.

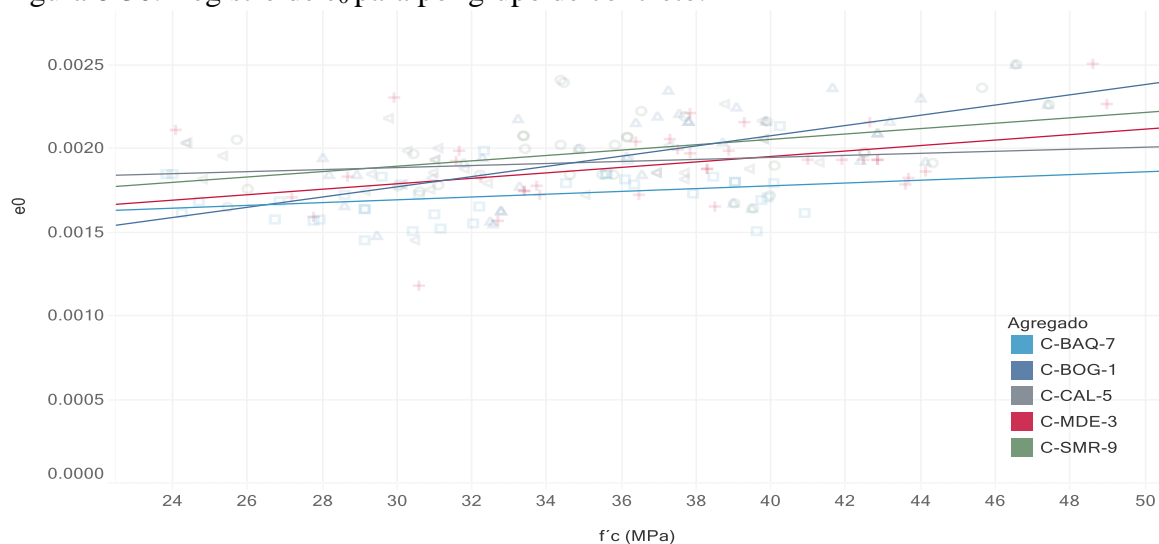


Figura 8-31 Modelos para estimar el valor de  $\varepsilon_{c0}$  por tipo de agregado en lo diseños convencionales.

La Figura 8-31 presenta la regresión lineal para cada uno de los agregados del grupo convencional. Dado el interés de caracterizar el valor de  $\varepsilon_{c0}$  en los concretos usados en Colombia, se analizan los parámetros del ajuste lineal, presentados en la Tabla 8-10 en la que se calcula un modelo de tendencia lineal para  $\varepsilon_{c0}$  dado  $f'_c$  (MPa). El modelo puede ser significativo cuando el factor agregado  $p \leq 0.05$ . Solo los diseños C-BOG-1, son lo que muestran este comportamiento de manera que, podría establecerse una tendencia entre la resistencia y la deformación alcanzada al elaborar concretos con este agregado.

Para los demás modelos el valor  $p$  del término  $f'_c$  (MPa) muestra poca relevancia en el modelo como se presenta en la Tabla 8-10, lo cual se observa gráficamente con una pendiente tendiente a 0 en la Figura 8-31. Estos comportamientos se pueden asociar a la aleatoriedad del ensayo, sin poder asociarse a un comportamiento propio de las variables estudiadas. De igual manera, se evaluaron diferentes tipos de modelos, como exponencial, logarítmico entre otros, sin obtener valores  $p$  significativos que expliquen el comportamiento de  $\varepsilon_{c0}$  desde la resistencia a la compresión con un comportamiento asociados a una distribución uniforme.

Tabla 8-10. Parámetros de la regresión lineal para  $\varepsilon_{c0}$  respecto al agregados en los diseños convencionales.

Paneles		Color	Línea		Coeficientes				
Fila	Columna	Agregado	valor p	DF	Término	Valor	StdErr	valor t	valor p
e0	$f'_c$ (MPa)	9	0.0191223	32	$f'_c$ (MPa)	1.608e-05	6.515e-06	2.46793	0.019123
					intercepto	0.0014111	0.0002376	5.93937	< 0.0001
e0	$f'_c$ (MPa)	7	0.0673928	35	$f'_c$ (MPa)	8.368e-06	4.433e-06	1.88761	0.06739
					intercepto	0.0014417	0.000147	9.8068	< 0.0001
e0	$f'_c$ (MPa)	5	0.305859	28	$f'_c$ (MPa)	6.087e-06	5.836e-06	1.04302	0.305859
					intercepto	0.0017028	0.0001946	8.75234	< 0.0001
e0	$f'_c$ (MPa)	3	0.0133918	34	$f'_c$ (MPa)	1.631e-05	6.249e-06	2.60926	0.013391
					intercepto	0.0012992	0.0002341	5.55044	< 0.0001
e0	$f'_c$ (MPa)	1	< 0.0001	34	$f'_c$ (MPa)	3.056e-05	6.675e-06	4.57861	< 0.0001
					intercepto	0.0008534	0.0002486	3.43214	0.001590



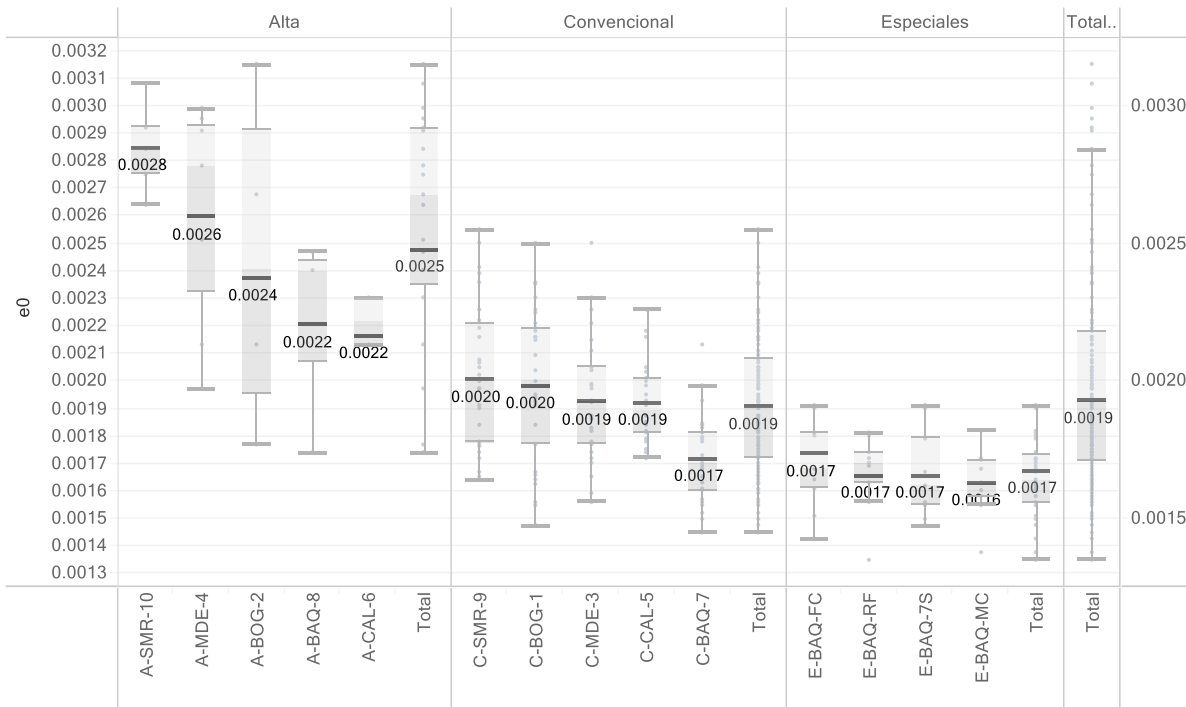


Figura 8-32 Diagrama de caja para  $e_0$  de los agregados usados para la elaboración de concretos de alta, convencionales y especiales.

Dado que los modelos lineales, en la mayoría de los casos arrojaron poca significancia tanto en la pendiente como en el intercepto, se plantea la opción que el parámetro  $\varepsilon_{c0}$  sea un valor propio de cada tipo de concreto. La Figura 8-32 presenta la mediana y cuartiles de interés en diagramas de caja para todos los agregados por grupos de diseño. Se observan comportamientos similares por grupo de agregados, siendo los concretos de alta los de mayor magnitud con promedio de 0.0025, percentil 50 de 0.0027, seguidos de los concretos convencionales con promedio de 0.0019 y percentil 50 de 0.0019 y los especiales que están elaborados con el agregado #7 que obtuvo percentil 50 y promedio de 0.0017, repite su comportamiento con las nuevas características evaluadas, sin marcar diferencia alguna de estas en la magnitud del parámetro evaluado. De manera general el promedio de todos los datos se presentó en 0.0019, el percentil 2= 0.0014, percentil 50 = 0.0019 y el percentil 98 = 0.028.

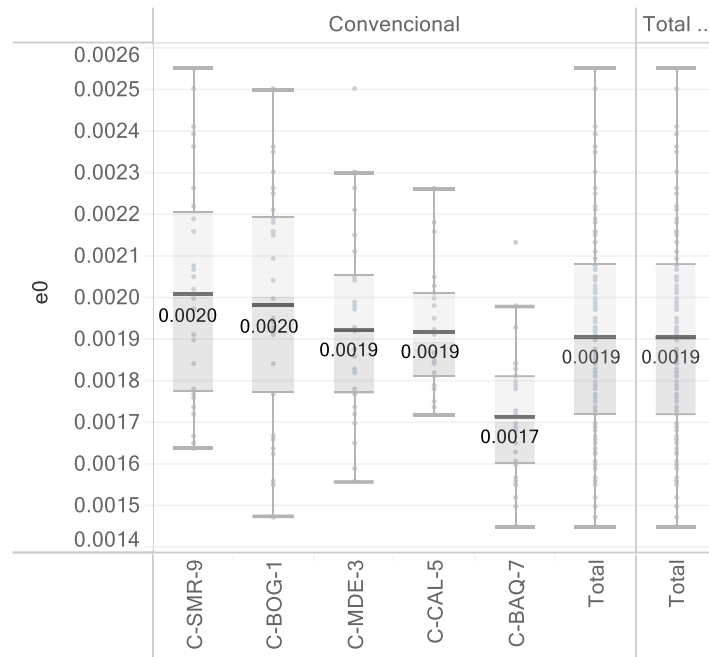


Figura 8-33. Diagrama de caja para  $e_0$  de los agregados usados para la elaboración de concretos convencionales.

La Figura 8-34 y la Figura 8-35 presentan el comportamiento por grupo de los agregados usados para la elaboración de los concretos del grupo convencional y especiales, siendo el agregado 1 y 9 los de mayor deformación al esfuerzo máximo con valores de media y promedio de 0.0020 y el agregado 7 el de menor valor con 0.0017, valores que se repiten en los diseños especiales. La Figura 8-35 presenta los resultados para los concretos de alta resistencia, siendo el agregado 10 el de mayor deformación unitaria en el esfuerzo máximo  $\varepsilon_{c0} = 0.0028$ . Aunque hay influencia del tipo de agregado, para resistencias entre 20 y 50 MPa el comportamiento para todos los agregados en este rango de resistencias se puede representar con el valor  $\varepsilon_{c0} = 0.0019$ , el cual es consistente con valores de texto guía de diseño estructural (Moehle, 2014).

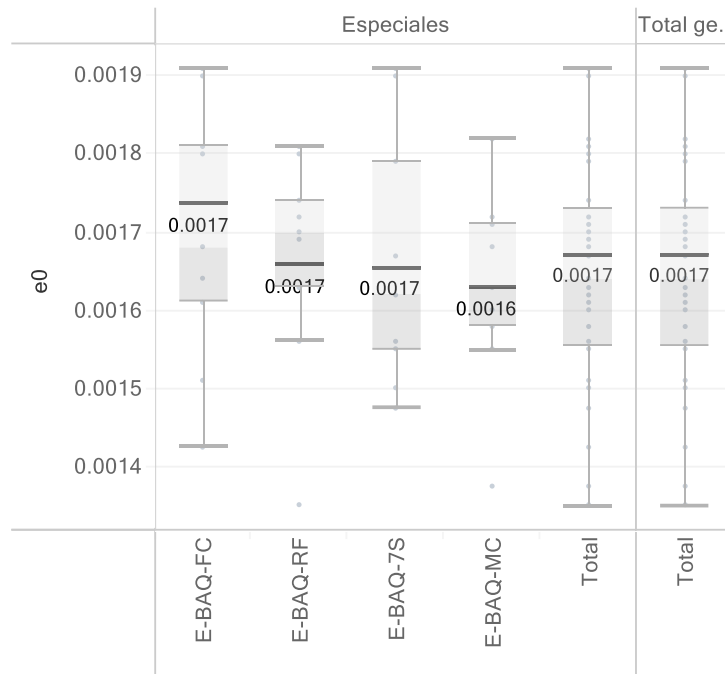


Figura 8-34 Diagrama de caja para  $e_0$  de los agregados usados para la elaboración de concretos especiales.

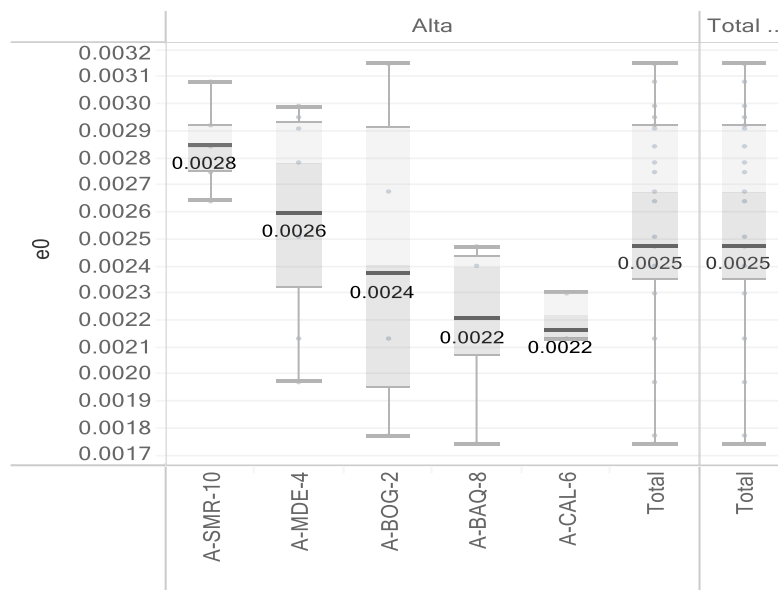


Figura 8-35. Diagrama de caja para  $e_0$  de los agregados usados para la elaboración de concretos de alta.

El histograma presentado en la Figura 8-36, muestran la distribución relativa de  $\varepsilon_{c0}$  por forma y superficie del agregado. Se observa que los agregados con superficies lisas generan menores valores de  $\varepsilon_{c0}$ , comportamiento que es característico de este tipo de agregados (Attard & Setunge, 1996).

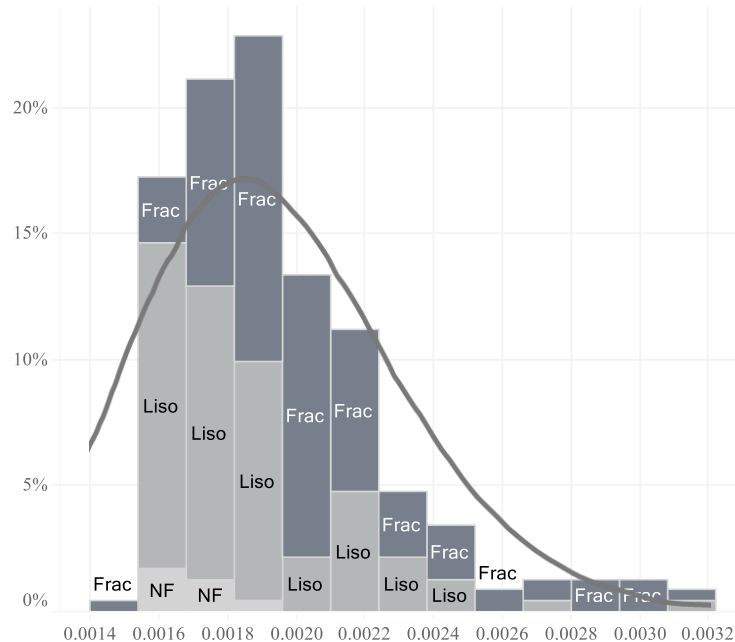


Figura 8-36 Histograma de  $\varepsilon_{c0}$  por superficie del agregado.

## 8.6 VPU

Dentro de los avances de la tecnología del concreto se han planteado mecanismos que permitan contrastar los criterios definidos en diseño, uno de ellos es el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico VPU, el cual es un ensayo no destructivo capaz de arrojar un diagnostico preliminar de la estructura que a través de relaciones con ciertos parámetros del concreto permite establecer el comportamiento de los elementos cuestionados. El ensayo de VPU consiste en medir el tiempo que demora un pulso ultrasónico en recorrer la masa de concreto, estableciendo una velocidad la cual no es una medida directa de las propiedades físico-mecánicas del concreto, por tal motivo se verá afectada por las condiciones de ensayo, en la calidad de colocación del concreto y los materiales usados. Conociendo lo anterior, esta investigación pretende evaluar el impacto de los resultados de este ensayo con diferentes fuentes de material creando relaciones entre sus resultados y las distintas propiedades evaluadas

La De los resultados, se evidencia que los diseños C-MED-3 presentan valores más altos de VPU respecto a los demás, presentando un sesgo en el gráfico de  $f'_c$ , caso contrario a

los resultados de  $E_c$  que donde los diseños realizados con este agregado son los más altos, asociados al mejor desempeño de VPU.

Figura 8-37 presenta los resultados de resistencia y módulo de elasticidad respecto a las lecturas de VPU para todas las muestras tomadas de los concretos elaborados con los distintos agregados y relaciones a/c, diferenciando los diseños por color, los circulares corresponden a los del grupo de alta y las cruces a los convencionales. De los resultados, se evidencia que los diseños C-MED-3 presentan valores más altos de VPU respecto a los demás, presentando un sesgo en el gráfico de  $f'_c$ , caso contrario a los resultados de  $E_c$  que donde los diseños realizados con este agregado son los más altos, asociados al mejor desempeño de VPU.

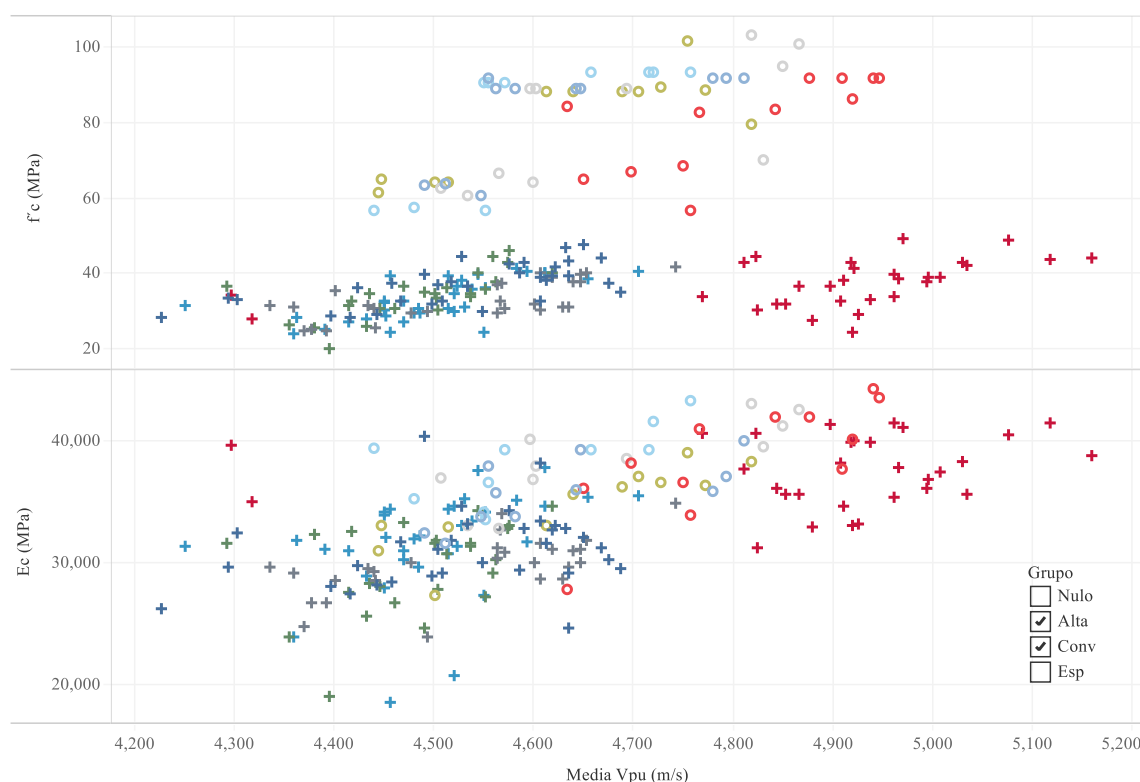


Figura 8-37 Relacion de la resistencia a la compresion  $f'_c$  y modulo de elasticidad  $E_c$  respecto a la media de las lecturas de VPU, por tipo de agregado y grupo de diseño.

La Tabla 8-11 presenta los coeficientes de la regresión lineal para la resistencia a la compresión, teniendo como base el valor de VPU, todos los valores  $p$  son menores a 0.05, resaltando que cada uno de ellos es importante para predecir el modelo y no están asociados a la aleatoriedad del ensayo. A lo largo de la revisión de literatura realizada se encontró que los modelos propuestos están basados en la función exponencial contemplando un gran espectro de resultado de resistencia entre los 5 y 80 MPa. Dado que en este apartado se presentan los resultados por grupos de diseño se realizó un análisis de sensibilidad entre los residuos obtenidos con el modelo exponencial y lineal concluyendo que los dos modelos entregan resultados similares de manera que se presenta el modelo lineal como la herramienta de fácil acceso.

Tabla 8-11 Coeficientes de la regresión lineal de  $f'c$  respecto a la VPU

<u>Fila</u>	<u>Columna</u>	<u>valor p</u>	<u>DF</u>	<u>Término</u>	<u>Valor</u>	<u>StdErr</u>	<u>valor t</u>	<u>valor p</u>
$f'c$ (MPa)	E-BAQ-7S	0.00017	9	Vpu (m/s)	0.0394	0.01	6.17	0.00017
				intercepto	-144.0810	28.75	-5.01	0.00073
$f'c$ (MPa)	E-BAQ-FC	< 0.0001	8	Vpu (m/s)	0.0571	0.01	8.77	< 0.0001
				intercepto	-222.3860	29.40	-7.57	< 0.0001
$f'c$ (MPa)	E-BAQ-MC	0.00012	6	Vpu (m/s)	0.0282	0.00	8.76	0.00012
				intercepto	-96.8221	14.53	-6.66	0.00055
$f'c$ (MPa)	E-BAQ-RF	0.00021	10	Vpu (m/s)	0.0350	0.01	5.66	0.00021
				intercepto	-124.1100	27.88	-4.45	0.00123
$f'c$ (MPa)	C-BOG-1	< 0.0001	31	Vpu (m/s)	0.0299	0.01	4.80	< 0.0001
				intercepto	-98.4726	28.20	-3.49	0.00146
$f'c$ (MPa)	A-BOG-2	0.02850	9	Vpu (m/s)	0.0734	0.03	2.61	0.02850
				intercepto	-257.2850	130.51	-1.97	0.08016
$f'c$ (MPa)	C-MDE-3	0.00510	27	Vpu (m/s)	0.0321	0.01	3.05	0.00510
				intercepto	-121.1620	51.94	-2.33	0.02737
$f'c$ (MPa)	A-MDE-4	0.01170	10	Vpu (m/s)	0.0769	0.02	3.08	0.01170
				intercepto	-289.8090	120.16	-2.41	0.03657
$f'c$ (MPa)	C-CAL-5	< 0.0001	28	Vpu (m/s)	0.0325	0.01	5.40	< 0.0001
				intercepto	-114.6100	27.32	-4.20	0.00025
$f'c$ (MPa)	A-CAL-6	0.01794	9	Vpu (m/s)	0.0822	0.03	2.89	0.01794
				intercepto	-304.0660	133.29	-2.28	0.04846
$f'c$ (MPa)	C-BAQ-7	< 0.0001	35	Vpu (m/s)	0.0415	0.01	5.27	< 0.0001
				intercepto	-154.1010	35.47	-4.34	0.00011
$f'c$ (MPa)	A-BAQ-8	0.01339	8	Vpu (m/s)	0.1175	0.04	3.16	0.01339
				intercepto	-459.4380	171.16	-2.68	0.02774
$f'c$ (MPa)	C-SMR-9	0.00102	24	Vpu (m/s)	0.0424	0.01	3.74	0.00102
				intercepto	-155.5000	50.84	-3.06	0.00539
$f'c$ (MPa)	A-SMR-10	0.00102	10	Vpu (m/s)	0.0838	0.02	4.57	0.00102
				intercepto	-308.1670	85.00	-3.63	0.00465

Figura 8-38 presenta las regresiones lineales entre  $f'c$  y  $E_c$  con el resultado de VPU para cada uno de los agregados usados en los diseños convencionales. La mayor relación se presenta con los resultados de resistencia en los que la dispersión entre los valores medidos y los estimados es más pequeña, brindando una mayor confianza de los resultados obtenidos.

La

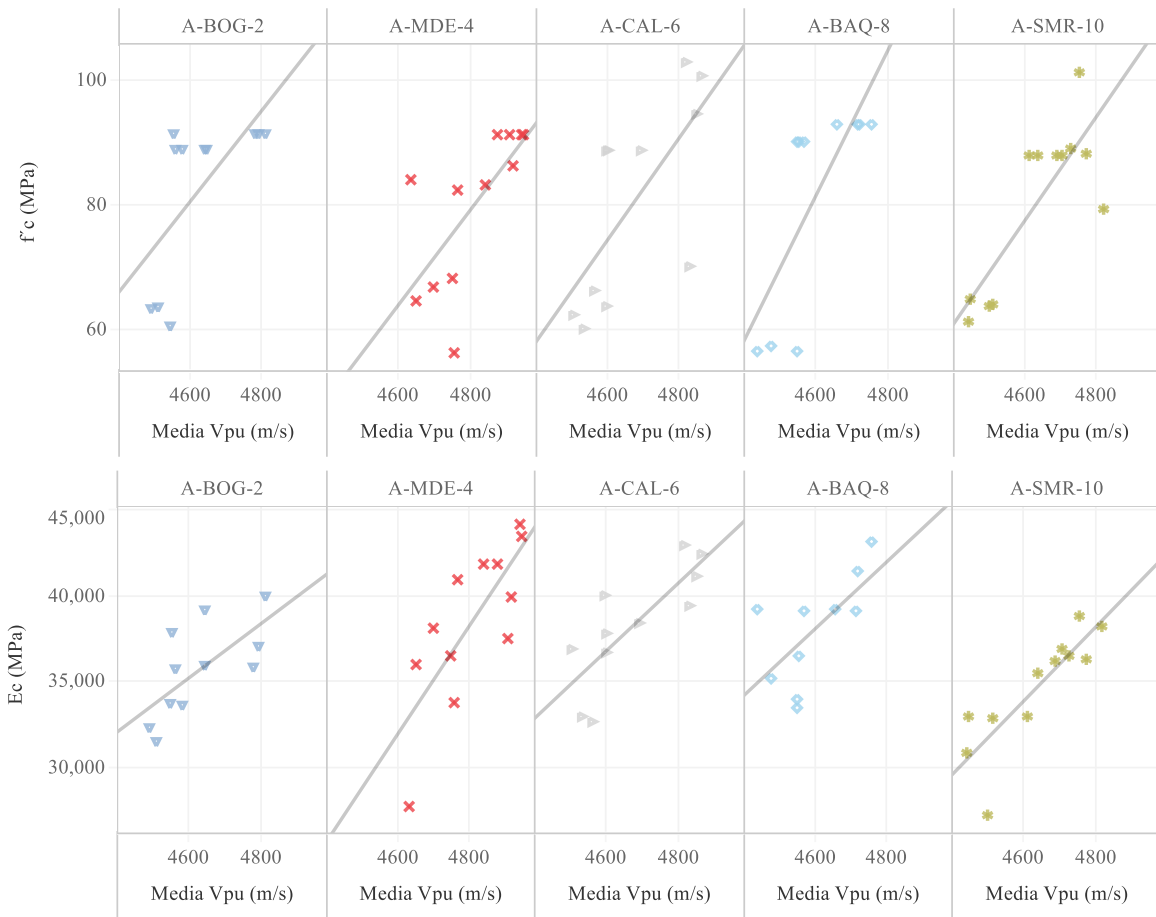


Figura 8-39 presenta los resultados para el grupo de diseños de alta resistencia, en los que la relación entre  $f'_c$  y  $E_c$  respecto al resultado de VPU tienen un comportamiento muy similar mostrando gran relación entre el módulo elasticidad y los valores medidos. Siendo nuevamente los diseños elaborados con el agregado de Medellín (A-MED-4) los que arrojan mejor desempeño. Por otro lado, la Figura 8-40 presenta los resultados para el grupo de los diseños especiales. El diseño con modificación de caras fracturadas (E-BAQ-MC) presenta un módulo de elasticidad con una pendiente notoriamente mayor a los demás, en la que el incremento de las lecturas de VPU tienen mayor impacto en sus resultados, posiblemente este comportamiento esta asociado a la modificación de la superficie realizada al agregado, ya que la onda de pulso ultrasónico que viaja a través del concreto especialmente en la ITZ posee una mayor velocidad que los otros diseños, donde la mayor cantidad de caras fracturadas permite una mejor conexión con la ITZ restringiendo el paso de la onda ultrasónica dando como resultado mejores velocidades. Las otras condiciones especiales evaluadas no presentan una modificación considerable de los parámetros evaluados.

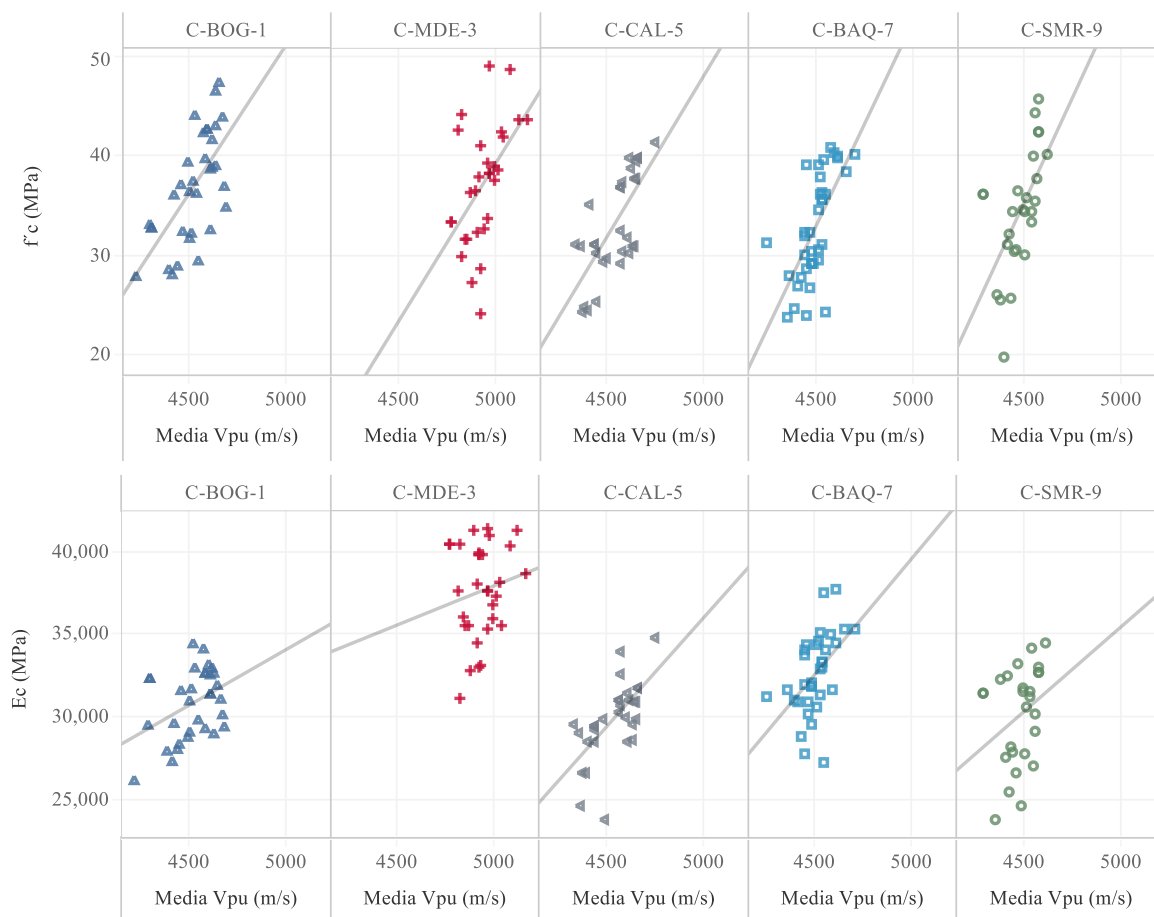


Figura 8-38 Regresión lineal entre la  $f'_c$  y  $E_c$  con la VPU, con los distintos agregados usados en los diseños convencionales.



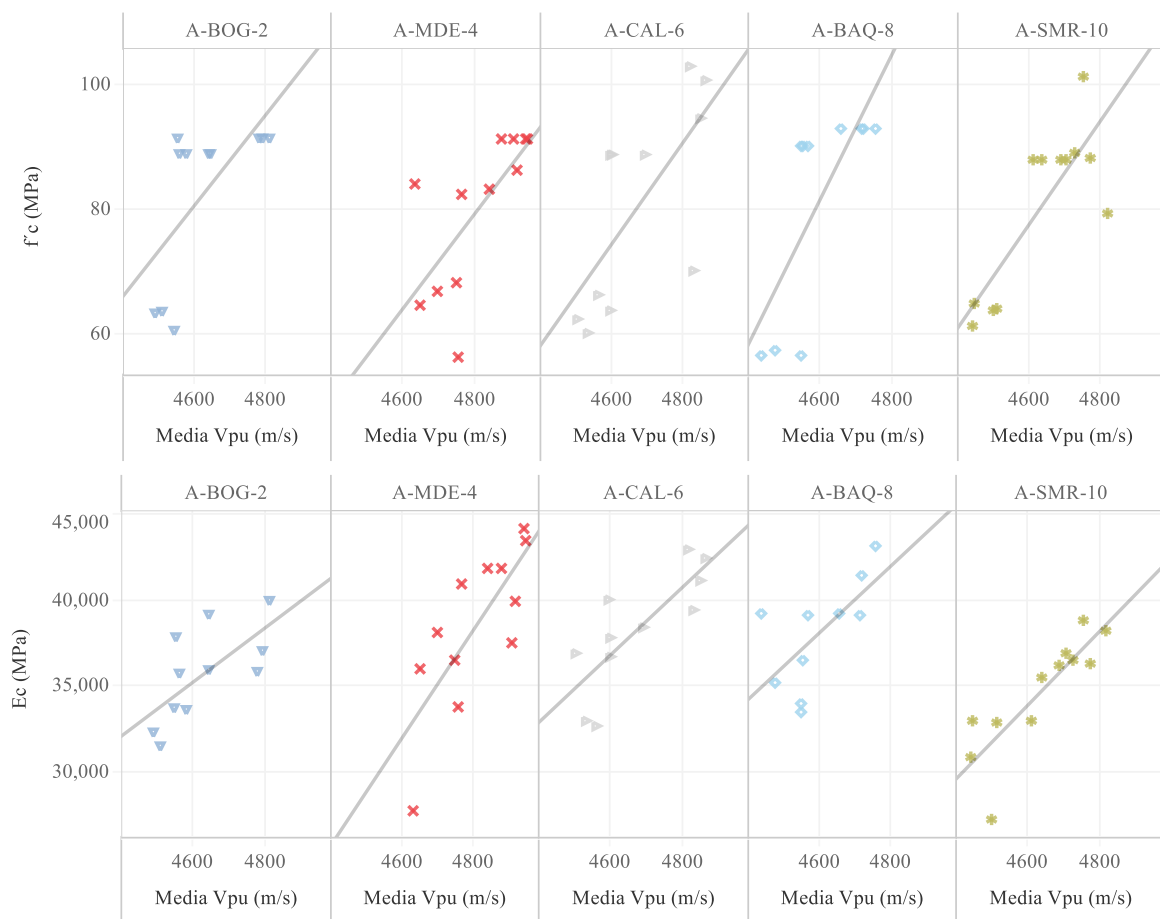


Figura 8-39 Regresión lineal entre la  $f'_c$  y  $E_c$  con la VPU, con los distintos agregados usados en los diseños de alta.

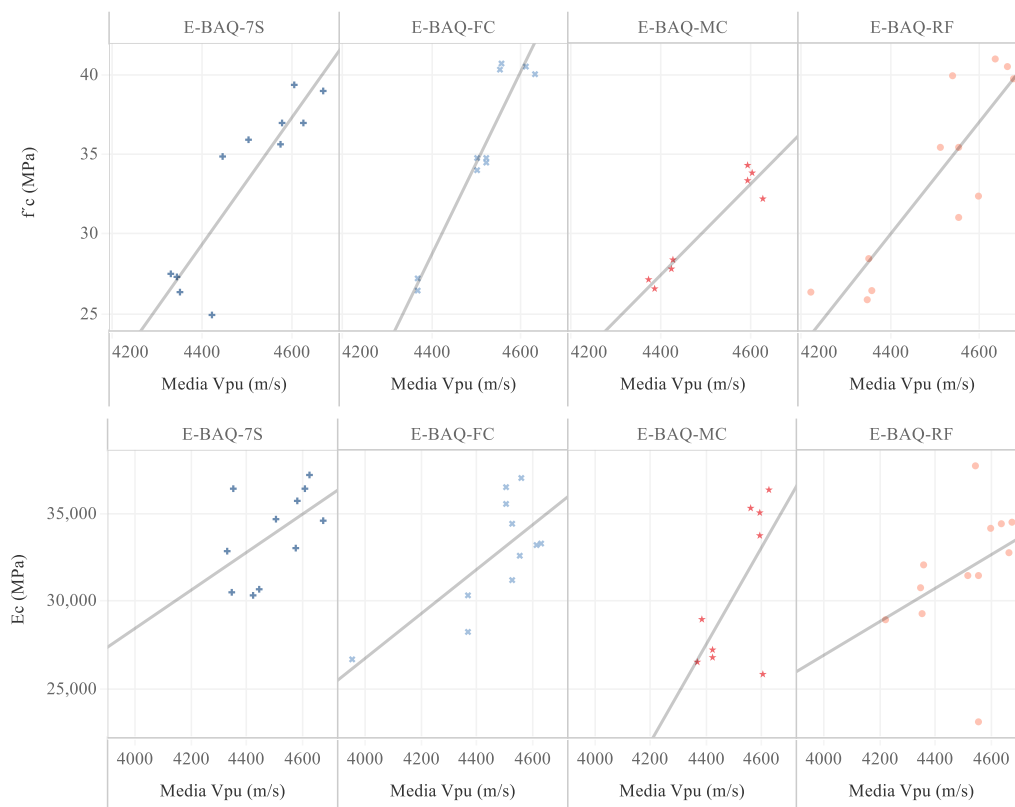


Figura 8-40 Regresión lineal entre la  $f'_c$  y  $E_c$  con la VPU, con los distintos agregados usados en los diseños especiales.

La el cual presentaba una relación marcada. El mejor comportamiento lo presentan los concretos del grupo de alta resistencia corroborando el análisis realizado anteriormente.

Tabla 8-12 presenta los resultados de los coeficientes de regresión lineal de  $E_c$  respecto a la VPU, con valores  $p$  muy cercanos al límite de 0,05 evidenciando una débil relación, caso contrario al comportamiento analizado previamente de la VPU respecto a la resistencia de la compresión el cual presentaba una relación marcada. El mejor comportamiento lo presentan los concretos del grupo de alta resistencia corroborando el análisis realizado anteriormente.

Tabla 8-12 Coeficientes de la regresión lineal de  $E_c$  respecto a la VPU

Paneles		Línea		Coeficientes				
Fila	Columna	valor $p$	DF	Término	Valor	StdErr	valor $t$	valor $p$
Ec (MPa)	E-BAQ-7S	0.0918	9	Vpu (m/s)	10.8	5.7	1.887	0.0918
				intercepto	-14771.1	25775.8	-0.573	0.5806
Ec (MPa)	E-BAQ-FC	0.0104	9	Vpu (m/s)	12.6	3.9	3.226	0.0104
				intercepto	-23778.6	17501.4	-1.359	0.2073
Ec (MPa)	E-BAQ-MC	0.0484	7	Vpu (m/s)	27.6	11.6	2.387	0.0484
				intercepto	-93854.3	52166.8	-1.799	0.1150
Ec (MPa)	E-BAQ-RF	0.2178	10	Vpu (m/s)	9.5	7.2	1.315	0.2178

Ec (MPa)	C-BOG-1	0.0244	30	intercepto	-11110.6	32585.3	-0.341	0.7402
				Vpu (m/s)	6.8	2.9	2.369	0.0244
Ec (MPa)	A-BOG-2	0.0215	9	intercepto	-30.8	13024.3	-0.002	0.9981
				Vpu (m/s)	15.9	5.7	2.776	0.0215
Ec (MPa)	C-MDE-3	0.4047	29	intercepto	-37899.6	26507.7	-1.430	0.1866
				Vpu (m/s)	4.8	5.6	0.846	0.4047
Ec (MPa)	A-MDE-4	0.0035	10	intercepto	14105.6	27818.5	0.507	0.6159
				Vpu (m/s)	31.6	8.3	3.789	0.0035
Ec (MPa)	C-CAL-5	0.0002	28	intercepto	-113542.0	40128.8	-2.829	0.0179
				Vpu (m/s)	13.4	3.1	4.300	0.0002
Ec (MPa)	A-CAL-6	0.0030	9	intercepto	-30757.1	14085.9	-2.184	0.0375
				Vpu (m/s)	19.9	4.9	4.032	0.0030
Ec (MPa)	C-BAQ-7	0.0033	32	intercepto	-54560.6	23045.1	-2.368	0.0421
				Vpu (m/s)	14.1	4.4	3.174	0.0033
Ec (MPa)	A-BAQ-8	0.0376	8	intercepto	-30937.8	20019.4	-1.545	0.1321
				Vpu (m/s)	19.6	7.9	2.489	0.0376
Ec (MPa)	C-SMR-9	0.1366	24	intercepto	-52004.9	36197.4	-1.437	0.1887
				Vpu (m/s)	10.4	6.7	1.540	0.1366
Ec (MPa)	A-SMR-10	0.0005	10	intercepto	-16415.5	30198.8	-0.544	0.5917
				Vpu (m/s)	21.7	4.3	5.086	0.0005
				intercepto	-66025.7	19792.3	-3.336	0.0075

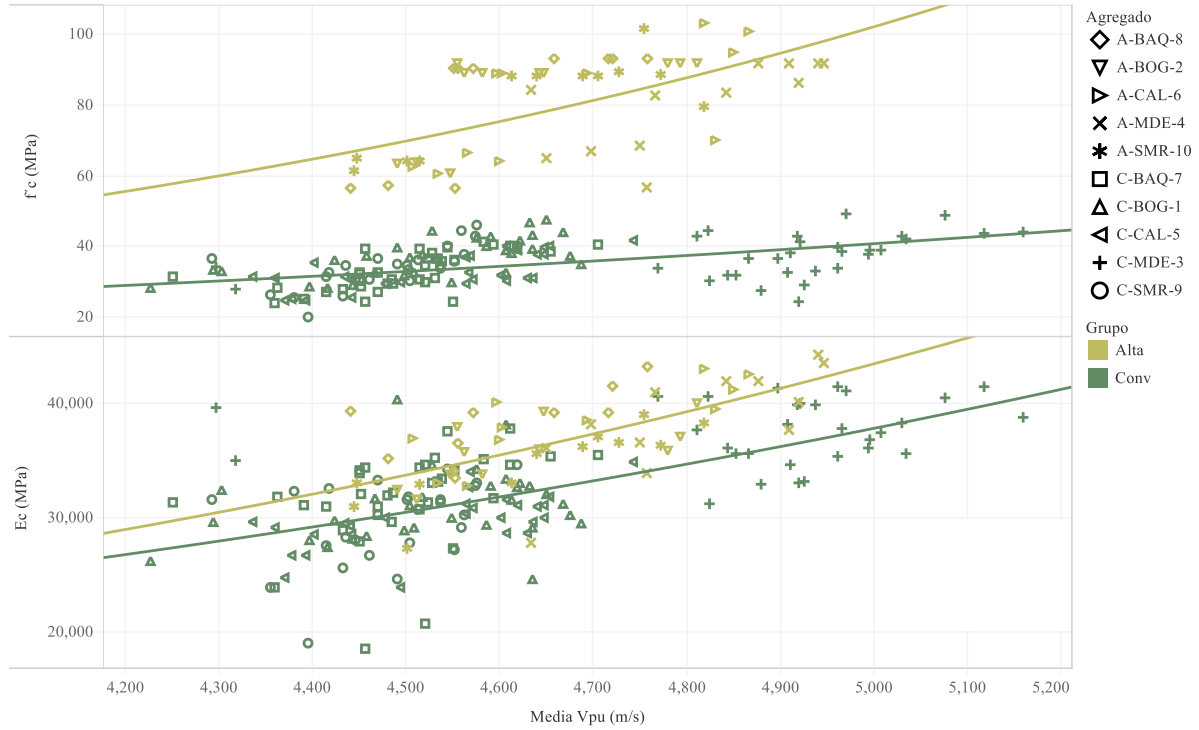


Figura 8-41 Regresión exponencial entre  $f'_c$  y  $E_c$  con la VPU, con los distintos agregados usados en los diseños de alta y convencionales.

La

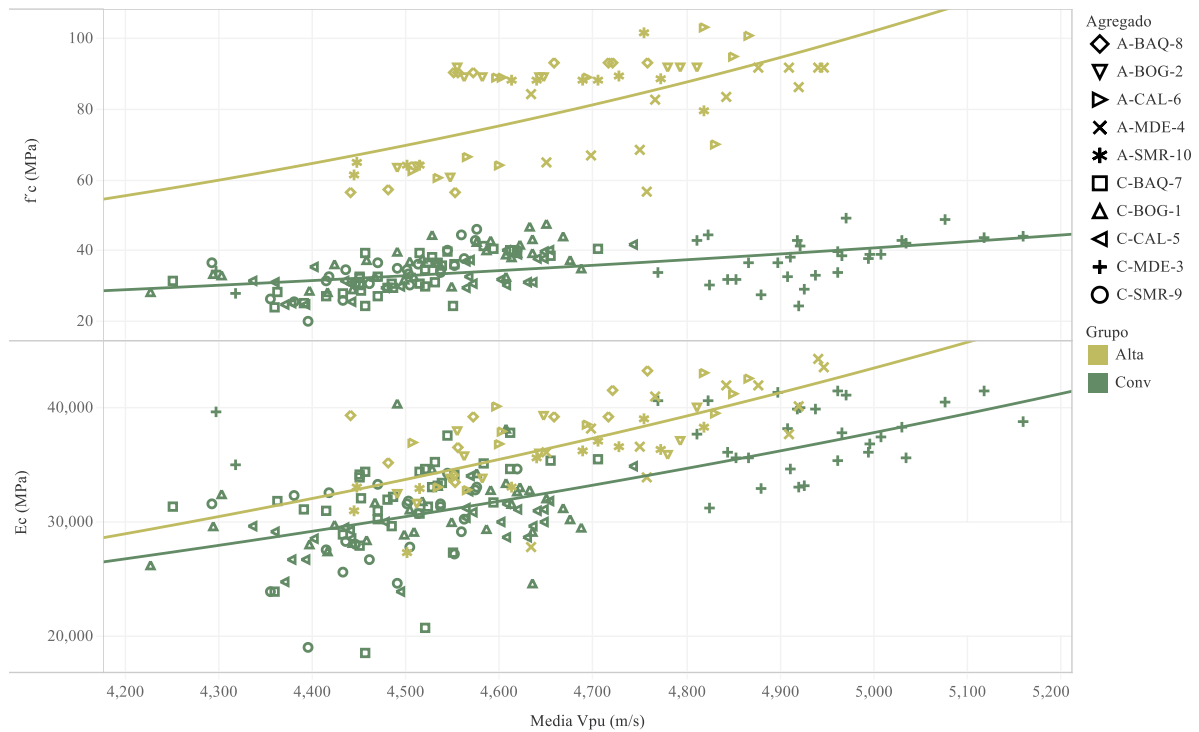


Figura 8-41 expone los resultados de  $f'_c$  y  $E_c$  generando dos grupos: diseños de alta resistencia y diseños convencionales, mostrando que al separarlos en esos dos Parámetros su comportamiento es notoriamente distinto, presentando menores residuos entre los valores medidos y los estimados a través del modelo. Evidenciando que es necesario trabajar con modelos distintos cuando se tienen altas cuantías de cementante que es la mayor diferencia entre los dos grupos establecidos. La Tabla 8-13 muestra los coeficientes de la relación exponencial por grupos de diseño la cual posee valores P menores a 0,05 demostrando la importancia que los Parámetros establecidos son capaces de representar la resistencia a la compresión y el modulo de elasticidad. Todo esto demuestra la importancia de conocer el diseño de mezcla y los materiales usados para la elaboración del concreto, pues se ha demostrado que para una misma lectura de VPU se pueden obtener resultados distintos de los Parámetros físico mecánicos del concreto, que con un solo modelo no sería posible aprovechar las características arrojadas por cada grupo de diseño.

Tabla 8-13 Coeficientes de la regresión exponencial de  $f'_c$  y  $E_c$  respecto a la VPU

Paneles		Color	Línea		Término	Coeficientes			
Fila	Columna	Grupo	valor p	DF		Valor	StdErr	valor t	valor p
$f'_c$ (MPa)	Vpu (m/s)	Conv	< 0.0001	147	Vpu (m/s)	0.0004	0.0001	6.654	< 0.0001
					intercepto	4.8	0.2958	5.291	< 0.0001
$f'_c$ (MPa)	Vpu (m/s)	Alta	< 0.0001	54	Vpu (m/s)	0.0008	0.0001	5.211	< 0.0001
					intercepto	2.3	0.6833	1.198	0.236168
$E_c$ (MPa)	Vpu (m/s)	Conv	< 0.0001	147	Vpu (m/s)	0.0004	0.0000	9.013	< 0.0001
					intercepto	4352.2	0.2203	38.033	< 0.0001
$E_c$ (MPa)	Vpu (m/s)	Alta	< 0.0001	54	Vpu (m/s)	0.0005	0.0001	6.661	< 0.0001
					intercepto	3428.0	0.3565	22.834	< 0.0001

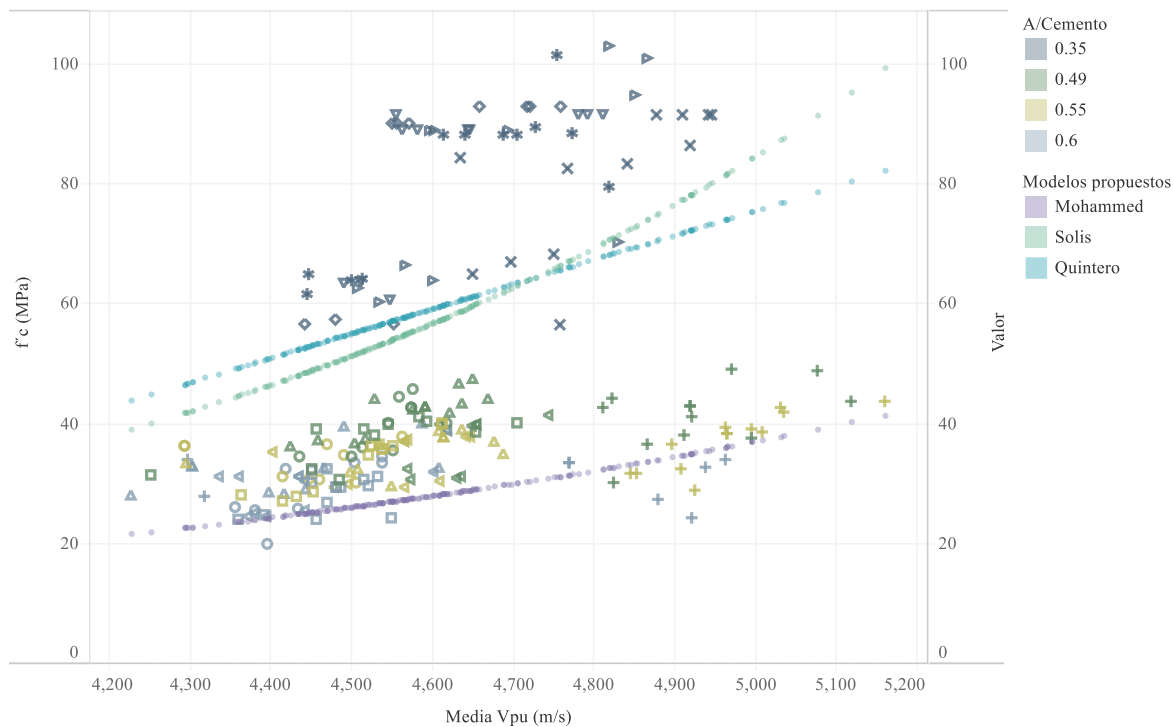


Figura 8-42 Relación entre  $f'_c$  y VPU de los resultados obtenidos respecto a los modelos planteados en la literatura

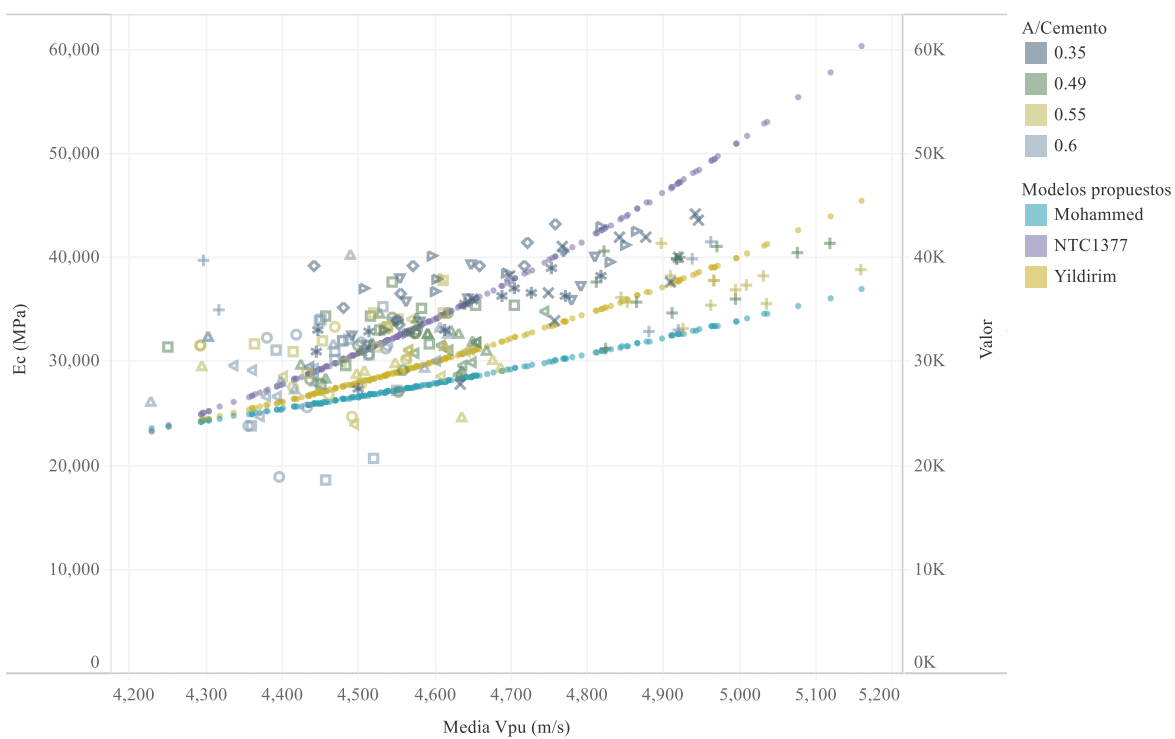


Figura 8-43 Relación entre  $E_c$  y VPU de los resultados obtenidos respecto a los modelos planteados en la literatura

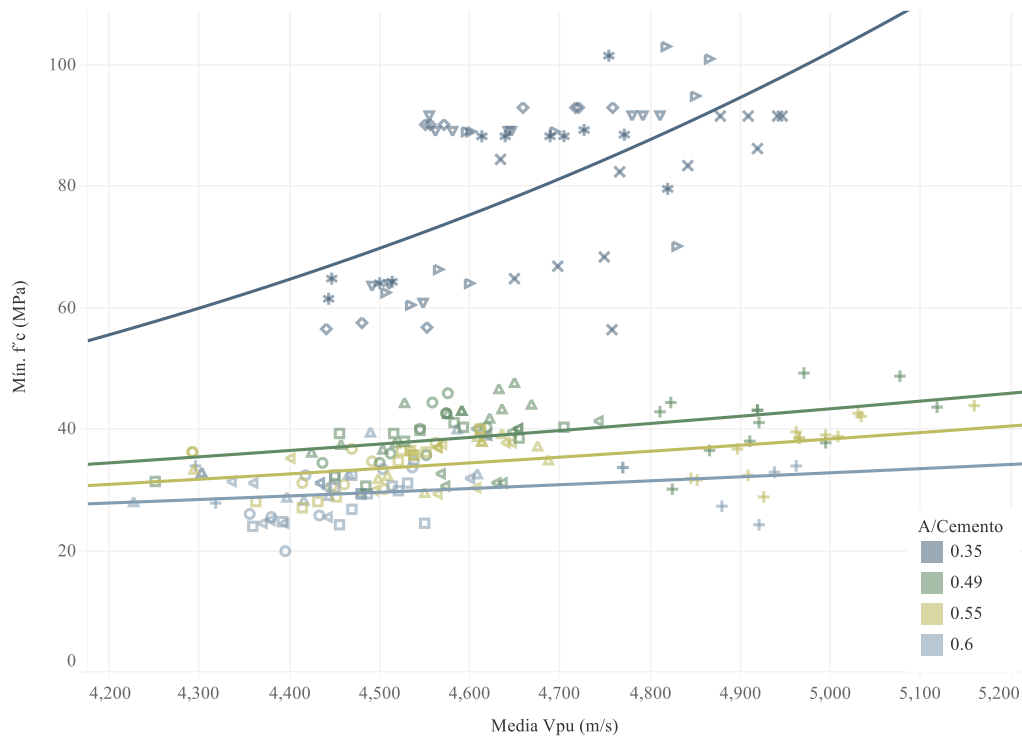
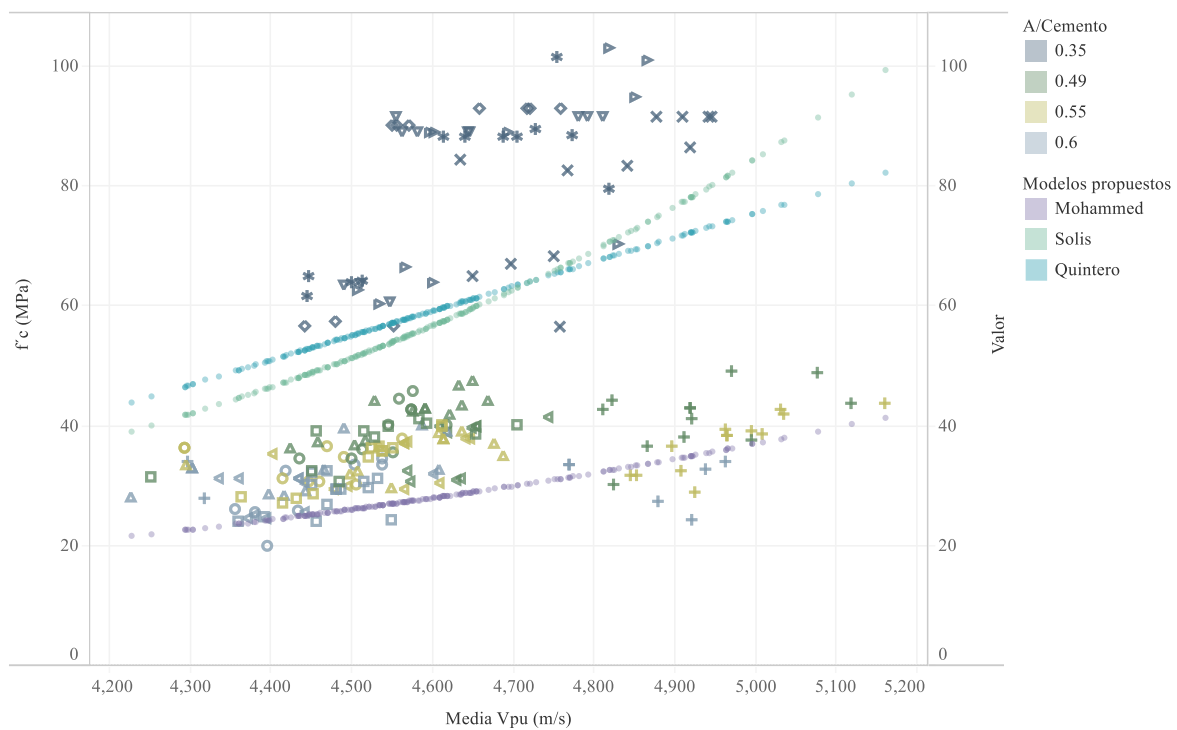


Figura 8-44 Relación de la resistencia a la compresión  $f'_c$  respecto a los resultados de VPU.



Figura

8-42

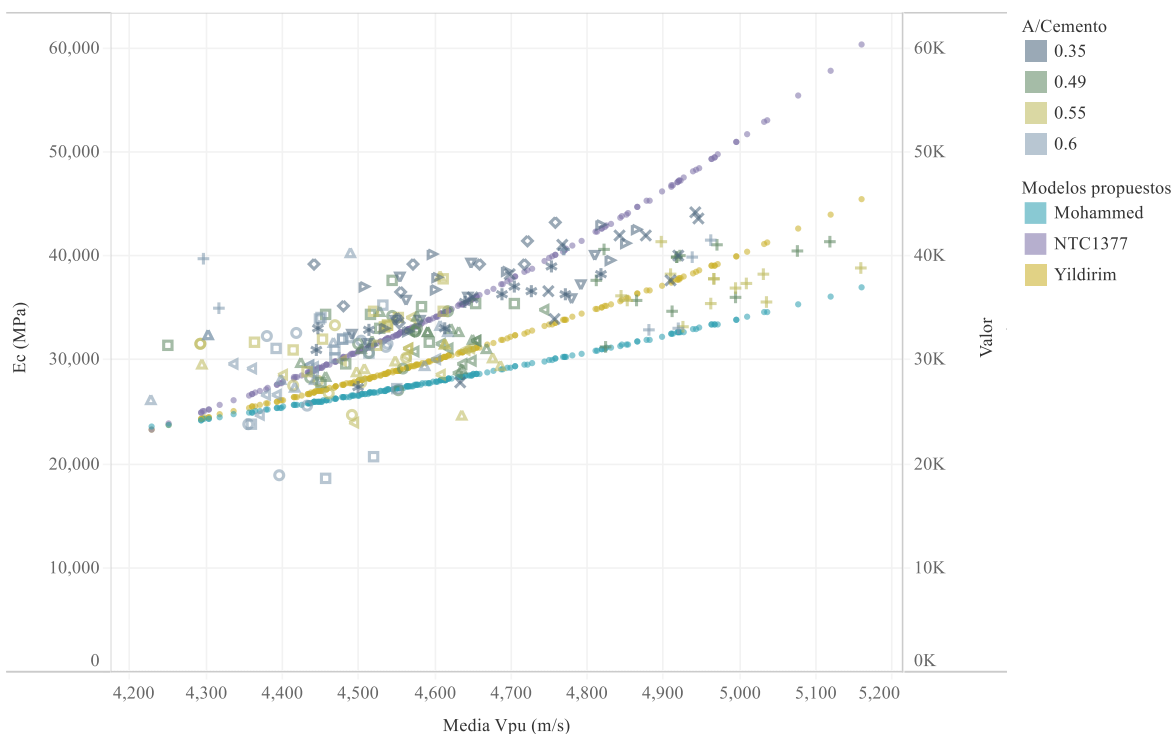


Figura 8-43

Las figuras anteriores presentan algunos de los modelos propuestos en la literatura para estimar la resistencia de la compresión y el módulo de elasticidad a partir del resultado de VPU, mostrando una gran relación entre los modelos actuales y los datos obtenidos en esta investigación. Estableciendo relaciones entre la resistencia a la compresión con el resultado de VPU, teniendo en cuenta las distintas a/c, cuyo coeficiente se presenta en la Tabla 8-14. Esta discriminación por relación a/c permite reducir los residuos entre los valores medidos y los estimados, garantizando mayor precisión al momento de realizar el ensayo en una estructura actual.

Tabla 8-14 Valores de la regresión exponencial entre la resistencia a la compresión ( $f'c$ ) y la VPU por relación a/c

Paneles		Color	Línea		Coeficientes				
Fila	Columna	A/Cemento	valor p	DF	Término	Valor	StdErr	valor t	valor p
$f'c$ (MPa)	Vpu (m/s)	0.6	0.09456	49	Vpu (m/s)	0.00021	0.000	1.705	0.095
					intercepto	11.7	0.543	4.530	< 0.0001
$f'c$ (MPa)	Vpu (m/s)	0.55	0.0002076	53	Vpu (m/s)	0.00027	0.000	3.985	0.000
					intercepto	9.9	0.315	7.271	< 0.0001
$f'c$ (MPa)	Vpu (m/s)	0.49	0.0020072	54	Vpu (m/s)	0.00029	0.000	3.247	0.002
					intercepto	10.3	0.412	5.651	< 0.0001
$f'c$ (MPa)	Vpu (m/s)	0.35	< 0.0001	54	Vpu (m/s)	0.00076	0.000	5.211	< 0.0001
					intercepto	2.3	0.683	1.198	0.236



## 8.7 Resistividad

Otros ensayos que ha tomado importancia es el ensayo de resistividad eléctrica del concreto, la cual es una propiedad de los materiales que cuantifica el grado en el que objeto evita el paso de una corriente eléctrica, siendo el concreto un material con una resistividad relativamente alta. Esta propiedad es intrínseca del material, lo que la hace independiente del tamaño del elemento ensayado.

La resistividad del concreto se ve afectada por los cambios en la microestructura, la composición de la solución de poros y la temperatura a la que se realiza el ensayo. La temperatura no fue un factor determinante a lo largo de la ejecución de estos ensayos, ya que se realizaron con temperatura controlada en condiciones de laboratorio. La variación de los resultados presentados a continuación se da por los dos factores restantes, en la que cada agregado modifica la ITZ y la solución de poros por la relación de a/c evaluadas.

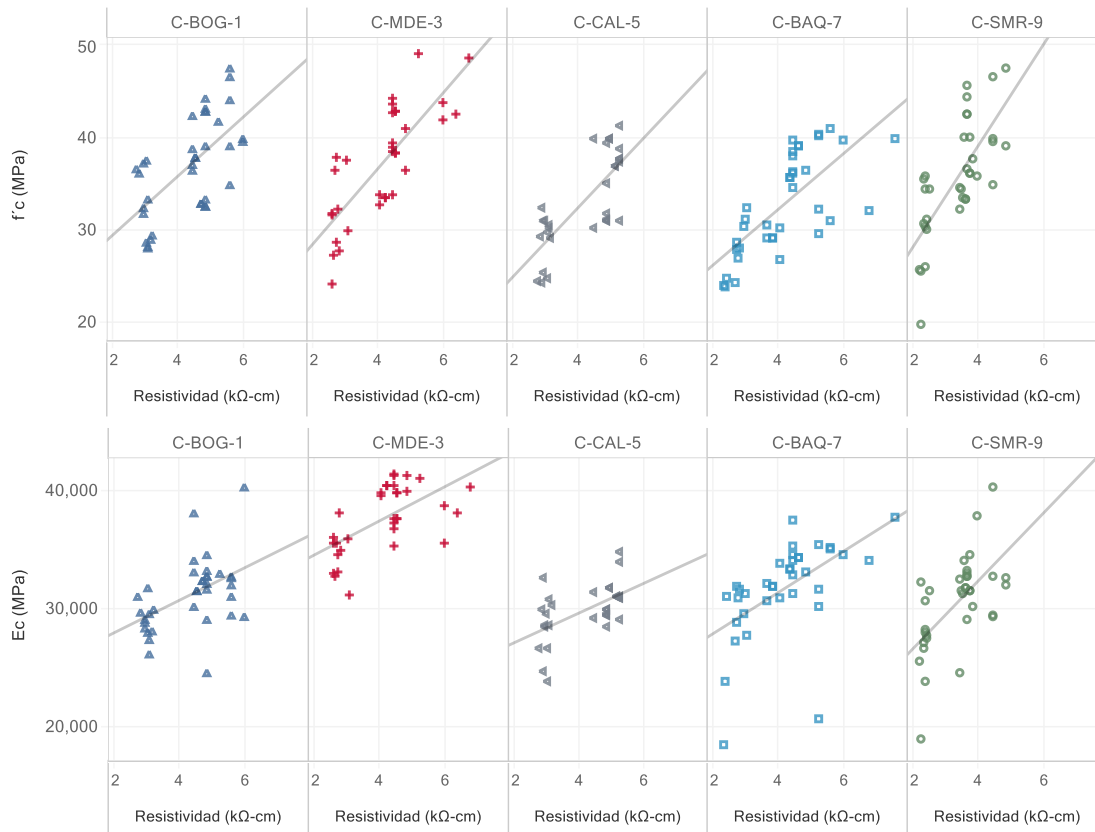


Figura 8-45 Relación entre  $f'_c$  y  $E_c$ , respecto a la resistividad del concreto por tipo de agregado, para los concretos del grupo convencional.

La

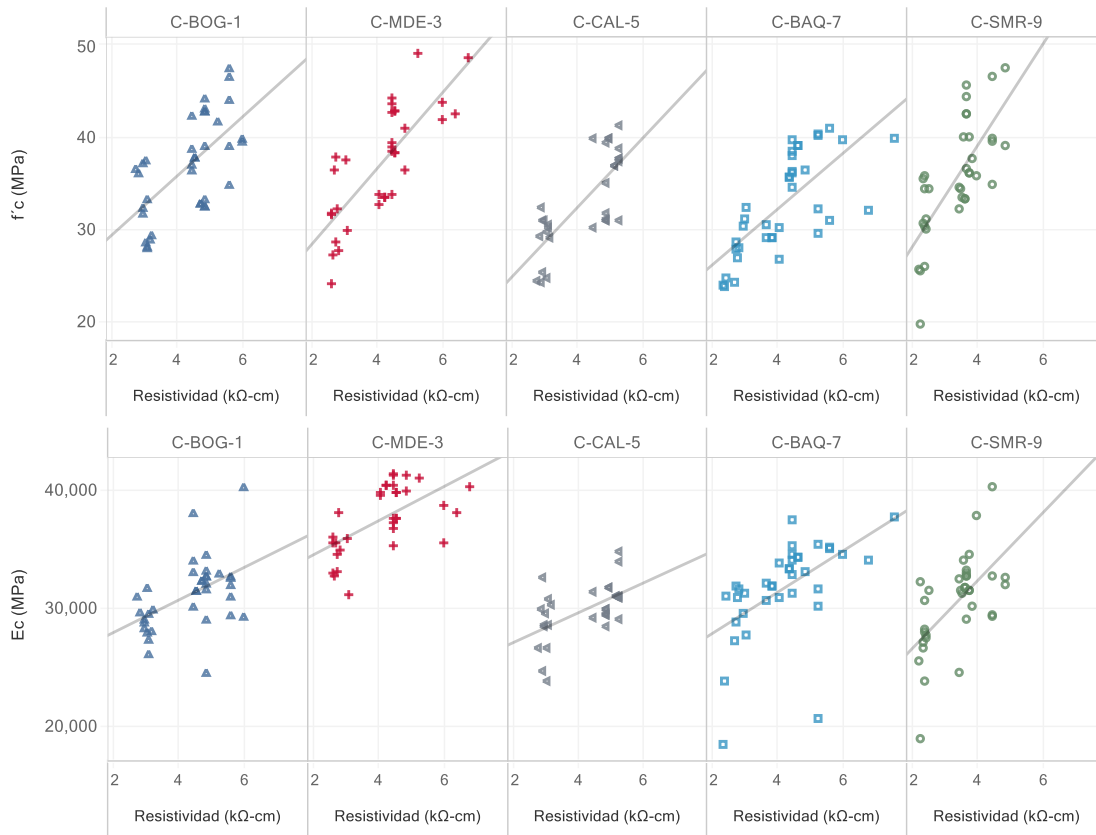


Figura 8-45 demuestra las relaciones entre  $f'_c$  t  $E_c$  respecto a la resistividad de concreto por tipo de agregado en los diseños convencionales, presentando una buena relación para los dos parámetros, la mayor resistividad se obtuvo con el agregado de Barranquilla (CEBAQ-7), mientras que el agregado usado en Santa Marta concentra todos sus resultados en un rango más pequeño de lecturas.

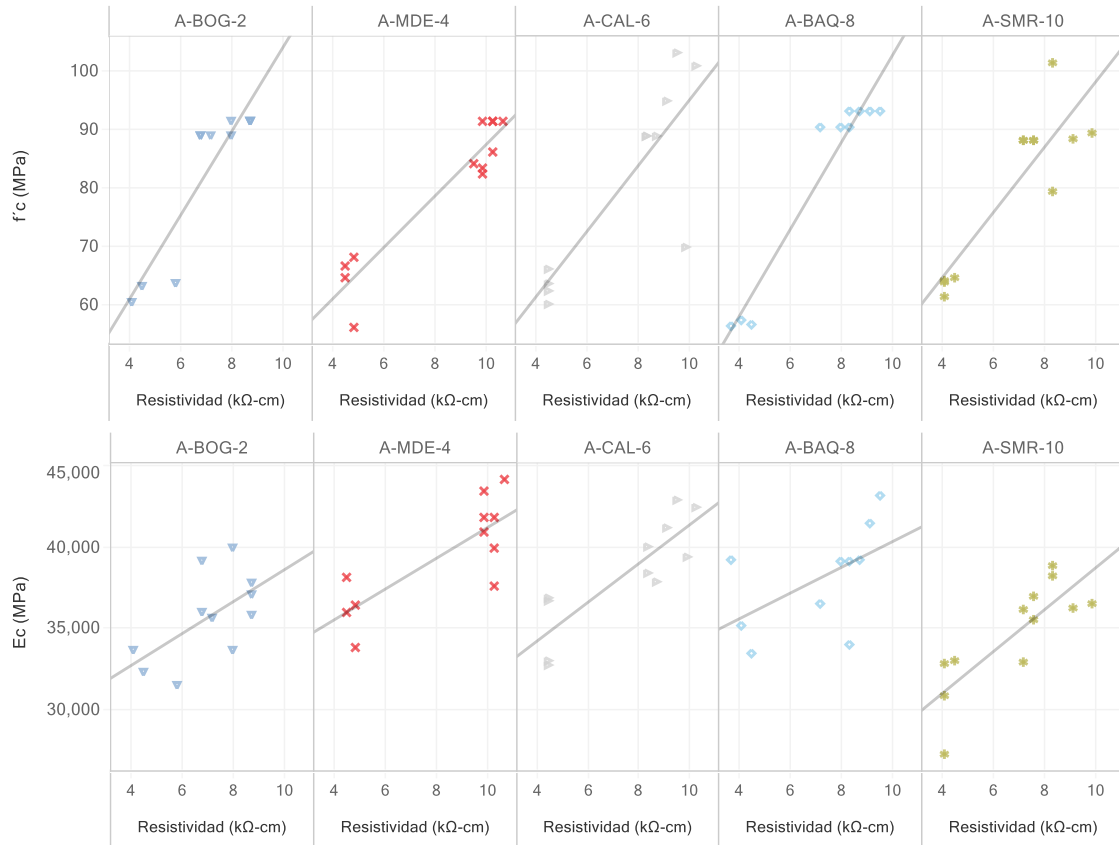


Figura 8-46 Relación entre  $f'_c$  y  $E_c$ , respecto a la resistividad del concreto por tipo de agregado, para los concretos del grupo de alta.

La Figura 8-47 demuestra que los diseños elaborados con el 7% de micro sílice presentan mayores resistividades que los demás diseños realizados en este grupo, evidenciando la modificación en la solución de poros producto de la modificación del cementante. Los demás diseños de estos grupos se comportan muy similar a lo presentado previamente del agregado de Barranquilla (C-BAQ-7).

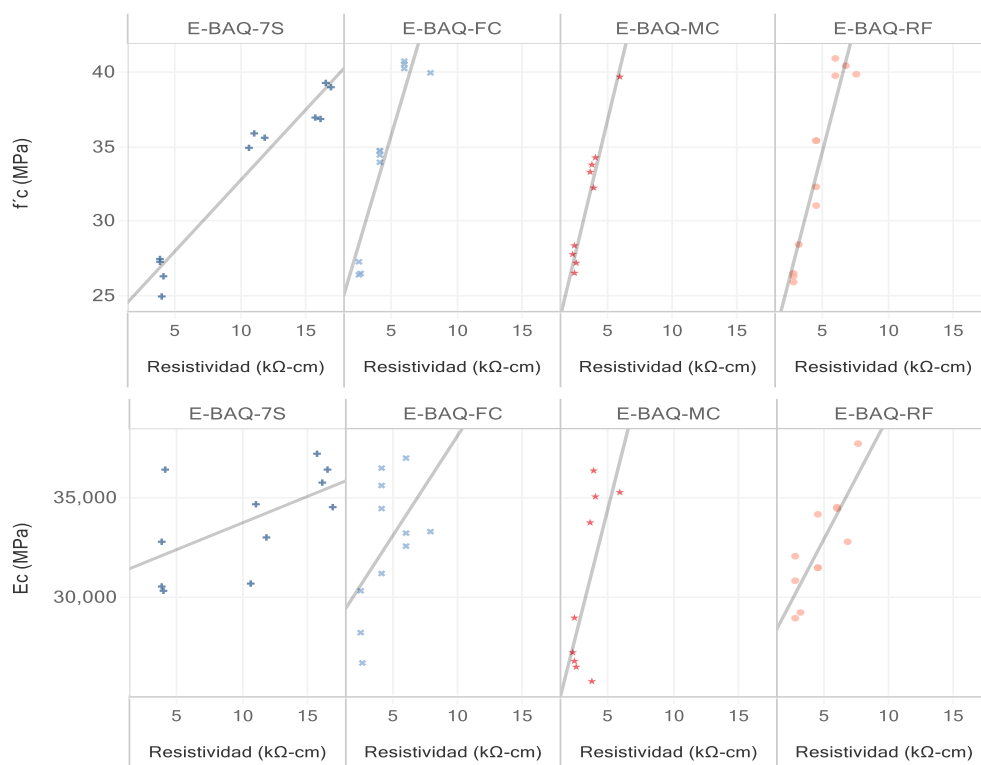


Figura 8-47 Relación entre  $f'_c$  y  $E_c$ , respecto a la resistividad del concreto por tipo de agregado, para los concretos de grupo especiales.

Tabla 8-15 Coeficientes de la regresión lineal de  $E_c$  respecto a la resistividad del concreto.

Fila	Columna	valor p	DF	Término	Valor	StdErr	valor t	valor p
Ec (MPa)	E-BAQ-7S	0.0588	9	(kΩ-cm)	263.88	121.99	2.16	0.0587615
				intercepto	31087.00	1429.16	21.75	< 0.0001
Ec (MPa)	E-BAQ-FC	0.0885	9	(kΩ-cm)	994.07	520.48	1.91	0.088475
				intercepto	28153.20	2509.23	11.22	< 0.0001
Ec (MPa)	E-BAQ-MC	0.0382	7	(kΩ-cm)	2566.56	1007.17	2.55	0.0381986
				intercepto	21675.80	3690.03	5.87	0.0006153
Ec (MPa)	E-BAQ-RF	0.0016	9	(kΩ-cm)	1227.85	276.41	4.44	0.0016184
				intercepto	26809.70	1360.49	19.71	< 0.0001
Ec (MPa)	C-BOG-1	0.0029	34	(kΩ-cm)	1387.22	431.79	3.21	0.0028749
				intercepto	25122.10	1926.45	13.04	< 0.0001
Ec (MPa)	A-BOG-2	0.0518	9	(kΩ-cm)	977.72	436.49	2.24	0.051846
				intercepto	28802.80	3138.40	9.18	< 0.0001
Ec (MPa)	C-MDE-3	0.0002	31	(kΩ-cm)	1457.45	350.56	4.16	0.0002354
				intercepto	31583.80	1501.72	21.03	< 0.0001
Ec (MPa)	A-MDE-4	0.0033	9	(kΩ-cm)	942.73	237.58	3.97	0.0032646
				intercepto	31760.80	2042.33	15.55	< 0.0001
Ec (MPa)	C-CAL-5	0.0016	28	(kΩ-cm)	1268.31	363.89	3.49	0.0016372
				intercepto	24519.30	1555.97	15.76	< 0.0001
Ec (MPa)	A-CAL-6	0.0007	9	(kΩ-cm)	1183.82	235.78	5.02	0.0007182
				intercepto	29500.20	1843.33	16.00	< 0.0001
Ec (MPa)	C-BAQ-7	0.0005	35	(kΩ-cm)	1759.78	459.77	3.83	0.0005125
				intercepto	24291.10	2005.45	12.11	< 0.0001

Ec (MPa)	A-BAQ-8	0.0974	8	(kΩ-cm)	788.77	420.25	1.88	0.0973692
				intercepto	32430.50	3126.63	10.37	< 0.0001
Ec (MPa)	C-SMR-9	0.0001	33	(kΩ-cm)	2896.72	670.71	4.32	0.000135
				intercepto	20735.00	2321.76	8.93	< 0.0001
Ec (MPa)	A-SMR-10	0.0013	10	(kΩ-cm)	1281.53	288.92	4.44	0.001263
				intercepto	25872.60	2054.43	12.59	< 0.0001

Tabla 8-16 Coeficientes de la regresión lineal de  $f'_c$  respecto a la resistividad del concreto.

Fila	Columna	valor p	DF	Término	Valor	StdErr	valor t	valor p
$f'_c$ (MPa)	E-BAQ-7S	< 0.0001	9	(kΩ-cm)	0.94	0.08	11.80	< 0.0001
				intercepto	23.31	0.94	24.88	< 0.0001
$f'_c$ (MPa)	E-BAQ-FC	< 0.0001	9	(kΩ-cm)	2.94	0.42	7.08	< 0.0001
				intercepto	21.22	2.00	10.59	< 0.0001
$f'_c$ (MPa)	E-BAQ-MC	< 0.0001	7	(kΩ-cm)	3.60	0.30	12.05	< 0.0001
				intercepto	18.90	1.09	17.26	< 0.0001
$f'_c$ (MPa)	E-BAQ-RF	< 0.0001	10	(kΩ-cm)	3.36	0.37	9.02	< 0.0001
				intercepto	18.01	1.82	9.89	< 0.0001
$f'_c$ (MPa)	C-BOG-1	< 0.0001	34	(kΩ-cm)	3.21	0.68	4.72	< 0.0001
				intercepto	22.95	3.04	7.56	< 0.0001
$f'_c$ (MPa)	A-BOG-2	0.0001226	9	(kΩ-cm)	7.09	1.10	6.42	0.00012
				intercepto	32.91	7.94	4.15	0.00249
$f'_c$ (MPa)	C-MDE-3	< 0.0001	31	(kΩ-cm)	4.11	0.59	6.92	< 0.0001
				intercepto	20.15	2.55	7.91	< 0.0001
$f'_c$ (MPa)	A-MDE-4	< 0.0001	10	(kΩ-cm)	4.34	0.47	9.25	< 0.0001
				intercepto	43.86	4.07	10.77	< 0.0001
$f'_c$ (MPa)	C-CAL-5	< 0.0001	28	(kΩ-cm)	3.76	0.61	6.17	< 0.0001
				intercepto	17.32	2.61	6.63	< 0.0001
$f'_c$ (MPa)	A-CAL-6	0.0012727	9	(kΩ-cm)	5.54	1.20	4.61	0.00127
				intercepto	39.42	9.39	4.20	0.00231
$f'_c$ (MPa)	C-BAQ-7	< 0.0001	35	(kΩ-cm)	3.03	0.51	5.98	< 0.0001
				intercepto	20.06	2.21	9.07	< 0.0001
$f'_c$ (MPa)	A-BAQ-8	< 0.0001	8	(kΩ-cm)	7.36	0.67	11.04	< 0.0001
				intercepto	28.85	4.96	5.82	0.00039
$f'_c$ (MPa)	C-SMR-9	< 0.0001	33	(kΩ-cm)	5.51	0.90	6.12	< 0.0001
				intercepto	17.05	3.11	5.47	< 0.0001
$f'_c$ (MPa)	A-SMR-10	0.0001701	10	(kΩ-cm)	5.51	0.95	5.81	0.00017
				intercepto	42.80	6.74	6.35	< 0.0001

Como se ha mencionado anteriormente la solución de poros está regida por las cuantías y el tipo de cementante usado, la Figura 8-48 permite evidenciar este comportamiento cuando se relaciona con la resistencia de la compresión, caso distinto al módulo de elasticidad donde el ensayo no es capaz de mostrar las diferencias en resultados por variación de la relación de a/c. Lo que permite concluir que se puede obtener un mismo resultado de resistividad con diferentes resistencias a la compresión, nuevamente destacando la importancia de conocer el diseño de mezcla usado para la elaboración de los elementos a estimar. De manera general se podrían presentar dos modelos, los diseños de alta y los diseños convencionales como se puede observar en la Figura 8-49 brindando herramientas necesarias para la toma de decisiones.

Tabla 8-17 Coeficientes de la regresión lineal de  $f'c$  y  $Ec$  respecto a la resistividad del concreto, basado en la relación  $a/c$ .

Fila	Columna	A/Cemento	valor p	DF	Término	Valor	StdErr	valor t	valor p
$f'c$ (MPa)	(k $\Omega$ -cm)	0.6	< 0.0001	54	(k $\Omega$ -cm)	3.10	0.37	8.28	< 0.0001
					intercepto	18.31	1.53	11.99	< 0.0001
$f'c$ (MPa)	(k $\Omega$ -cm)	0.55	< 0.0001	55	(k $\Omega$ -cm)	2.96	0.24	12.30	< 0.0001
					intercepto	22.88	1.02	22.46	< 0.0001
$f'c$ (MPa)	(k $\Omega$ -cm)	0.49	< 0.0001	56	(k $\Omega$ -cm)	3.38	0.41	8.18	< 0.0001
					intercepto	25.82	1.75	14.77	< 0.0001
$f'c$ (MPa)	(k $\Omega$ -cm)	0.35	< 0.0001	54	(k $\Omega$ -cm)	5.26	0.44	12.01	< 0.0001
					intercepto	42.24	3.37	12.55	< 0.0001
$Ec$ (MPa)	(k $\Omega$ -cm)	0.6	0.0013843	54	(k $\Omega$ -cm)	1892.63	561.23	3.37	0.00138
					intercepto	23478.20	2289.85	10.25	< 0.0001
$Ec$ (MPa)	(k $\Omega$ -cm)	0.55	0.0006755	55	(k $\Omega$ -cm)	1460.68	405.33	3.60	0.00067
					intercepto	26299.20	1716.07	15.33	< 0.0001
$Ec$ (MPa)	(k $\Omega$ -cm)	0.49	0.0003228	56	(k $\Omega$ -cm)	1518.75	396.23	3.83	0.00032
					intercepto	26960.20	1677.92	16.07	< 0.0001
$Ec$ (MPa)	(k $\Omega$ -cm)	0.35	< 0.0001	54	(k $\Omega$ -cm)	1052.89	177.80	5.92	< 0.0001
					intercepto	29250.70	1365.83	21.42	< 0.0001

Tabla 8-18 Coeficientes de la regresión lineal de  $f'c$  y  $Ec$  respecto a la resistividad del concreto, basado en la relación  $a/c$ .

Fila	Columna	Grupo	valor p	DF	Término	Valor	StdErr	valor t	valor p
$f'c$ (MPa)	(k $\Omega$ -cm)	Conv	< 0.0001	169	(k $\Omega$ -cm)	3.33	0.31	10.61	< 0.0001
					intercepto	21.64	1.31	16.47	< 0.0001
$f'c$ (MPa)	(k $\Omega$ -cm)	Alta	< 0.0001	54	(k $\Omega$ -cm)	5.26	0.44	12.01	< 0.0001
					intercepto	42.24	3.37	12.55	< 0.0001
$Ec$ (MPa)	(k $\Omega$ -cm)	Conv	< 0.0001	169	(k $\Omega$ -cm)	1667.44	267.41	6.24	< 0.0001
					intercepto	25401.80	1118.95	22.70	< 0.0001
$Ec$ (MPa)	(k $\Omega$ -cm)	Alta	< 0.0001	54	(k $\Omega$ -cm)	1052.89	177.80	5.92	< 0.0001
					intercepto	29250.70	1365.83	21.42	< 0.0001

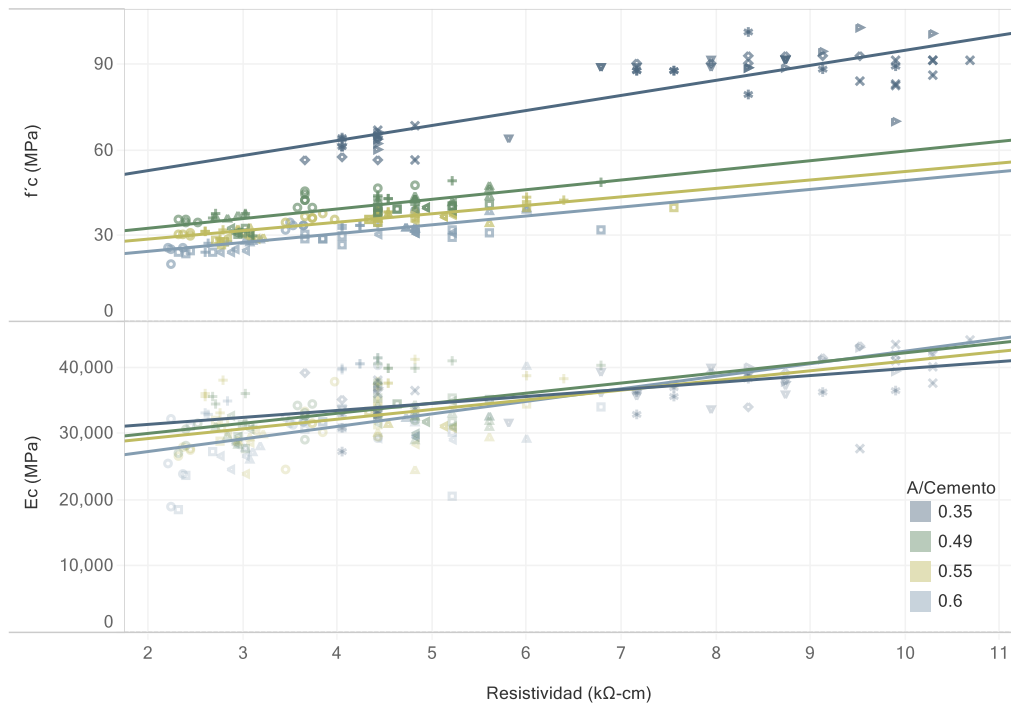


Figura 8-48 Relación entre  $f'_c$  y  $E_c$ , respecto a la resistividad del concreto por grupos de diseño.

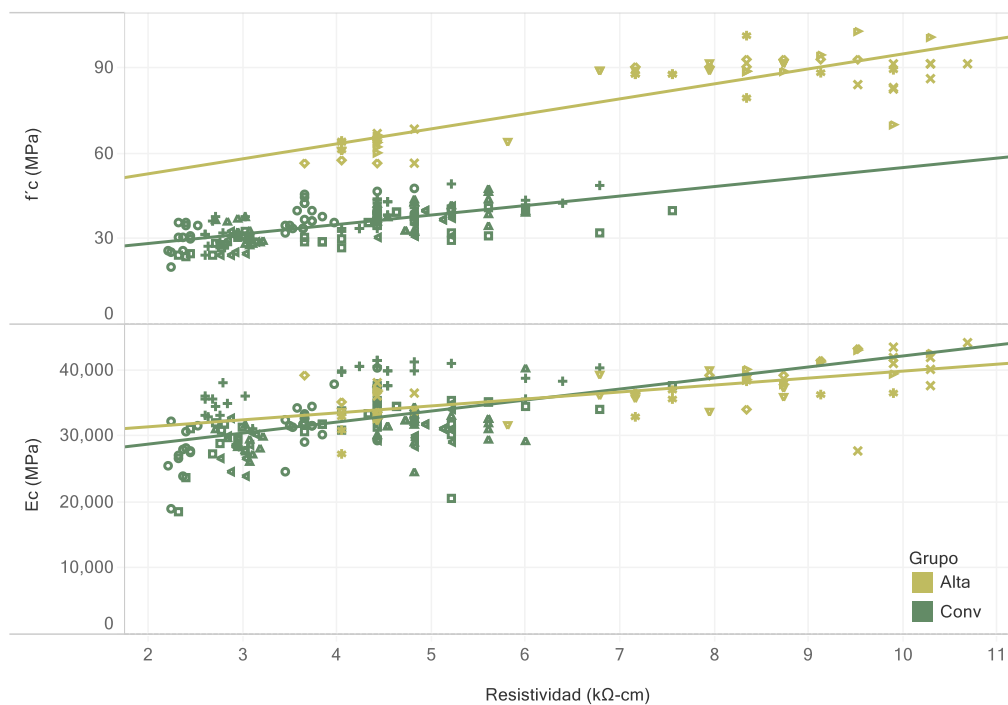


Figura 8-49 Relación entre  $f'_c$  y  $E_c$ , respecto a la resistividad del concreto por grupo de diseño.



## 8.8 Tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta se realizó a los agregados del grupo convencional a los 28 días, de manera que en este capítulo se presentan los resultados de 30 muestras. La Tabla 8-19 muestra el análisis de discordancia por tipo de agregado, de manera se demuestra que cada agregado tiene un comportamiento único en la relación entre la resistencia a la compresión y la tensión indirecta.

Tabla 8-19 Análisis de discordancia entre todos los agregados para los concretos convencionales, de la tensión indirecta MPa respecto a la resistencia a la compresión Mpa.

Field	DF	SSE	MSE	F	Valor p
Agregado	8	1.3411872	0.167648	6.65781	0.0002802

La Figura 8-50 presenta la dispersión de los resultados, por tipo de agregado, los cuales poseen una tendencia a aumentar a medida que se disminuye la relación agua/cemento. El agregado 3 es el que entrega mejor desempeño, siendo este el que posee el de menor desgaste, dado que sus resultados se encuentran en la parte derecha de la Figura 8-50, caso contrario del agregado 9 el cual presenta los resultados más bajos de tensión indirecta con los mayores desgastes, de manera que la relación es directa entre estos dos parámetros.

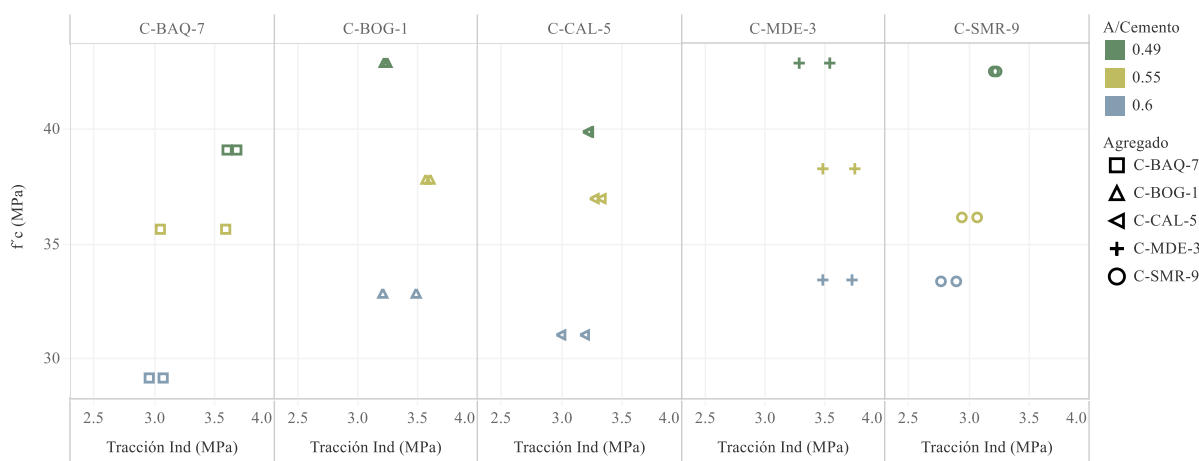


Figura 8-50 Relación grafica entre la resistencia a la compresión y la tensión indirecta de los concretos convencionales.

Dada la naturaleza del ensayo en la que se le aplican cargas axiales a un cilindro acostado y que el área de contacto es baja, se someten a cargas muy altas a la muestra, exigiendo al agregado al máximo, de manera que los resultados obtenidos están ligados al desprendimiento en la ITZ o a la falla del agregado, donde en la mayoría de los casos los planos de falla se da en la zona de contacto con el agregado, quedando marcado en la cara contraria la forma de la partícula, por otro lado, los resultados más bajos se dan en los cilindros donde falla el agregado

como el agregado 9, que posee una textura rugosa garantizando una buena adherencia de manera que no se observan planos de falla alrededor sino sobre el agregado.

Dados los resultados obtenidos, se resalta influencia que posee el agregado en la tracción indirecta de cada mezcla, de manera que agregados frágiles entregaran valores más bajos, en algunos casos, los planos de falla se dan por la falta de adherencia entre el agregado y la matriz de cemento, de manera que a mayor adherencia se dilata la falla en la ITZ, hasta llegar al punto donde al disminuir la relación agua/cemento, la matriz de cemento adquiere una rigidez que supera a la del agregado y se presentan caídas como el caso del agregado 1 y 3.

De manera general y como se presenta en los agregados con menor desgaste y con mayor rugosidad tendrán resultados más altos, hasta llegar el punto donde la rigidez de la matriz de cemento supera la del agregado, disminuyendo respecto a los resultados previos donde el agregado entregaba su mayor desempeño.

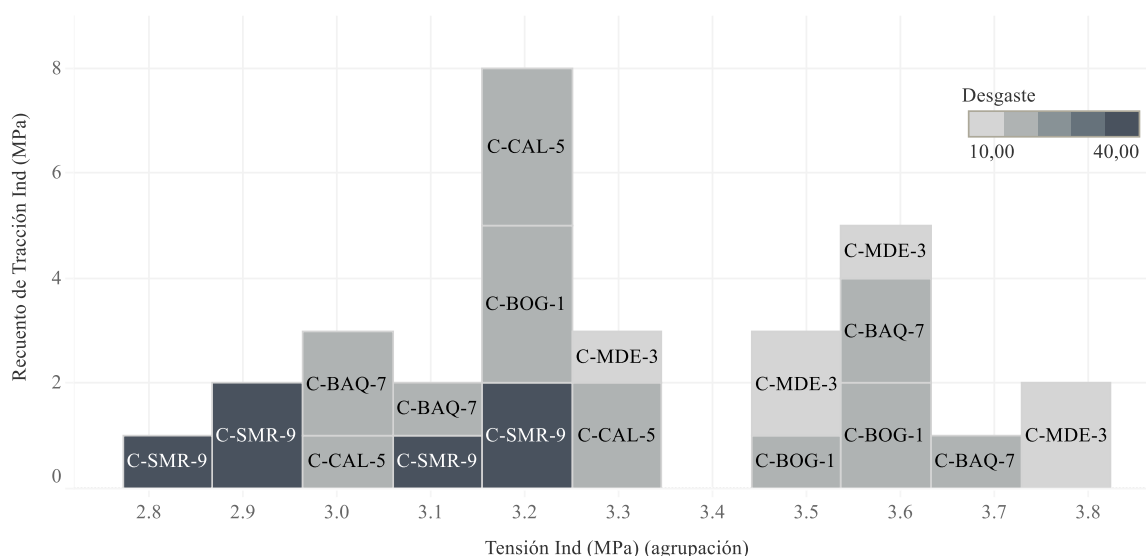


Figura 8-51 Histograma de los resultados de tensión indirecta por tipo de agregado, de los concretos convencionales.

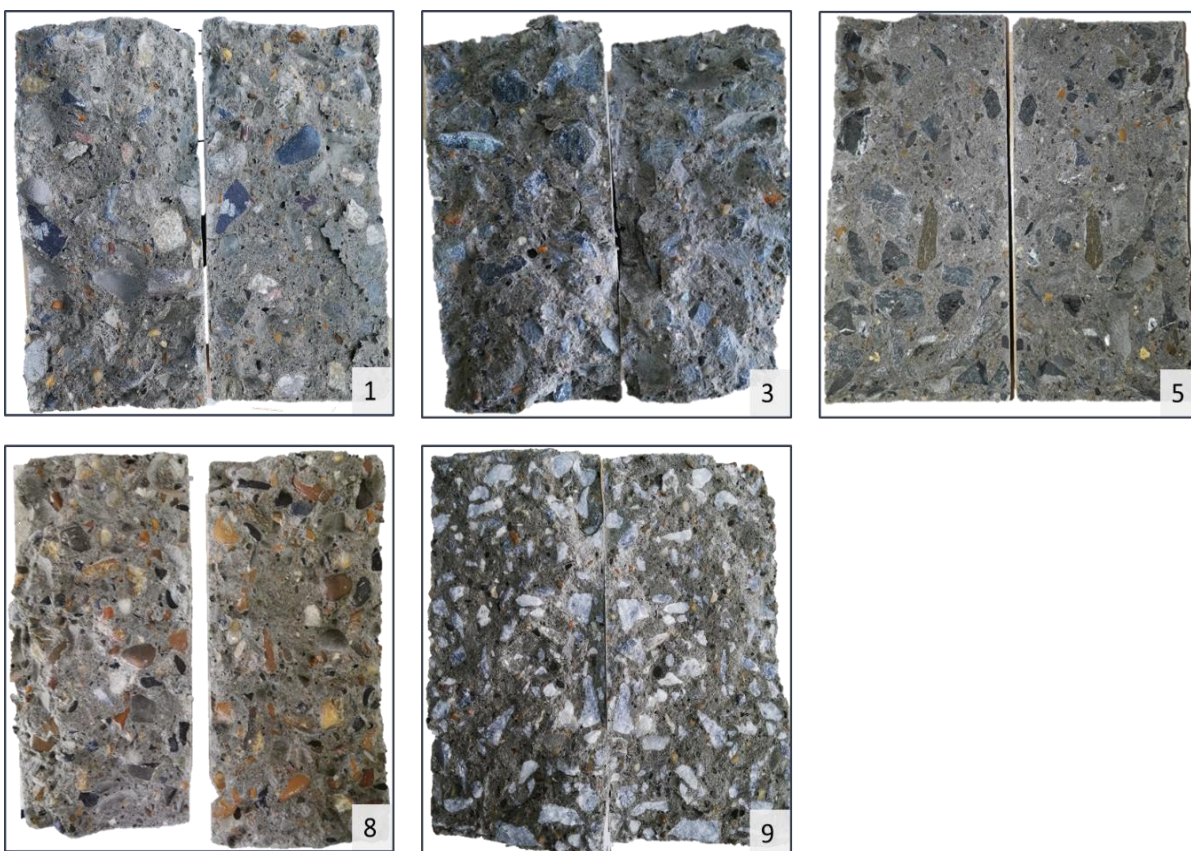


Figura 8-52 Registro fotográfico de las dos caras del cilindro luego del ensayo de tensión indirecta por tipo de agregado.

## Capítulo 9. Conclusiones

---

En esta investigación se presentan los resultados de los ensayos realizados a más de 380 probetas de concreto, obteniendo resistencia a la compresión  $f'_c$ , módulo de elasticidad  $E_c$ , resultados de VPU, resistividad del concreto, fracción indirecta y densidad, estableciendo relaciones entre las distintas propiedades evaluadas. Estos ensayos se realizaron con cinco fuentes de agregados gruesos usados en las principales ciudades de Colombia como lo son: Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla y Santa Marta.

Se establecieron tres grupos de diseño, los concretos convencionales entre 21-50 MPa, los de alta resistencia con resultados entre los 60-90 MPa y adicionalmente los del grupo especial cuyos diseños se elaboraron con humo de sílice, fibra de celulosa y reducción en las caras fracturadas de un agregado, definiendo el impacto en cada una de ellas.

Los diseños usados para la elaboración de los ensayos son capaces de representar el comportamiento real del concreto utilizado en las obras colombianas, ya que sus asentamientos se encuentran en el rango de  $7 \pm 1''$  y  $9 \pm 1''$  de los diseños convencionales y de alta, respectivamente. Este criterio es importante ya que los resultados en muchas de las investigaciones se basan en concretos cuyos diseños no son reproducibles a nivel industrial.

La resistencia a la compresión se ve influenciada por el tipo de agregado usado siendo los de cara fracturada y superficie rugosa los que entregan un mejor desempeño en el grupo de los convencionales, mientras que los agregados lisos y con pocas caras fracturadas presentan una ITZ más débil con la matriz, a tal punto de tener diferencias de resistencias a la compresión en el grupo de diseños convencionales cercanas a los 3 MPa, alrededor del 10% entre el agregado de mejor y menor desempeño. Los diseños de alta resistencia presentan la variación porcentual fue más baja a la edad de 56 días con una diferencia porcentual alrededor del 6%.

El mayor potencial en módulo de elasticidad se obtuvo en los agregados con bajo desgaste por máquina de los ángeles, la cual es una medida indirecta de la rigidez del agregado, se espera que agregados con menos del 17% entreguen comportamientos por encima de la media. No se observa que alguna de las características especiales presente un impacto contundente del módulo de elasticidad a las diferentes edades evaluadas.

Los resultados del módulo de elasticidad de esta investigación se encuentran entre los 19,000 y 41,000 MPa. Dentro de la revisión de la literatura se encontró que la mayoría de los modelos estiman el módulo de elasticidad de la siguiente manera  $E_c = \alpha \sqrt{f'_c}$ , siendo una ecuación de fácil aplicación, razón por la que se plantean los resultados a partir de esta.

Los diseños del grupo convencional son los que poseen las mayores pendientes ( $\alpha$ ), en un rango de  $5,119 \leq \alpha \leq 6,172$ , con un valor promedio de  $\alpha = 5,500$ , para una confiabilidad del 95% se obtiene un  $\alpha = 5,400$ . La evidencia estadística demuestra que cada agregado presenta un comportamiento propio, razón por la cual debe ser analizado individualmente.

El concreto realizado con el agregado usado en Medellín (C-MED-3) es el que entrega mayores módulos de elasticidad, mientras que el agregado usado en Santa Marta (C-SMR-9) es el de menor desempeño, todos por encima del valor plateado en el código de diseño NSR10, con  $\alpha = 4,700$ , la diferencia del módulo de elasticidad entre estos agregados alcanza un 18%. La clasificación en desempeño de los agregados usados para la elaboración de diseños convencionales por ciudad se distribuye de la siguiente manera: MDE, BEQ, BOG, CAL y SMR.

Mientras que los diseños de alta resistencia poseen pendientes más bajas alcanzando mayores deformaciones antes de llegar a la falla con valores entre  $3,928 \leq \alpha \leq 4,463$ , con un valor promedio de  $\alpha = 4,200$ , para una confiabilidad del 95% se obtiene un  $\alpha = 4,100$ . Inferiores a lo planteado en la NSR10, por más que cada agregado debe ser analizado independiente en este rango de resistencia, el impacto de cada uno de ellos es menor ya que las altas cuantías de cemento dominan la rigidez del concreto entregando módulos de elasticidad más cercanos entre un diseño y otro. Es importante que la normativa para el cálculo del módulo de elasticidad presente claramente esta diferencia y el modelo que debe usarse para los concretos de alta.

De manera general, los resultados obtenidos para los diseños convencionales son superiores al código ACI y NSR10, con diferencias alrededor del 17%. Un resultado similar se presenta entre el código australiano AS-3600 al compararlo con la pendiente de todos los resultados la cual difiere en un 6% respecto a los códigos anteriormente mencionados. Los resultados disponibles de investigaciones previas en Colombia subestiman los módulos de elasticidad alrededor de un 40%, solo los resultados previos presentado por Quimbay se acercan al resultado planteado para todo los concretos analizados.

Las condiciones especiales evaluadas se realizaron con el agregado usado en Barranquilla (C-BAQ-7) obteniendo los mismos resultados para el diseño de referencia, la inclusión de fibra de celulosa y la modificación de las caras fracturadas, que estadísticamente no representan una modificación en los resultados; mientras que la inclusión de microsilice al 7% incrementa  $E_c$  en un 5%. Este comportamiento es aplicable entre los 21 y 43 MPa, fuera de este rango no se evaluó el impacto de estas condiciones especiales.

El código de diseños NSR10, presenta alternativas para el cálculo del módulo de elasticidad, por densidad del concreto y por el origen del agregado. Esta condición no aplica para todos los casos, ya que, si hay una tendencia directa entre la relación de estos parámetros con el valor final de  $E_c$ , no siempre aplica para todos los tipos de agregados. Como es el caso del agregado usado en la ciudad de Cali (C-CAL-5), el cual es de origen ígneo y posee una densidad superior a la media con un valor de  $2,823 \text{ Kg/m}^3$ , que impacta directamente en la densidad del concreto, más no en los resultados obtenidos del módulo de elasticidad ya que este es un de los que entrega menor desempeño.

El agregado usado en los diseños convencionales en Barranquilla (C-BAQ-7) entrega un comportamiento interesante, partiendo del hecho que es de origen sedimentario con superficies lisas y cara fracturadas cercanas al 80%, entrega el menor desempeño de  $f'_c$ , no obstante, es el segundo con mejor módulo de elasticidad. Este comportamiento se puede originar por la gran resistencia al desgaste de este material con un 16%, haciéndolo muy rígido

permitiendo entregar este comportamiento al concreto, reduciendo las deformaciones a medida en que se aplican las cargas, mientras que las caras lisas y sin fracturación disminuyen la adherencia del concreto, permitiendo micro fisuras en la ITZ capaces de generar planos de falla a lo largo de la conexión entre el agregado y la matriz del concreto.

De manera general en caso de conocer las propiedades, resistencias y demás condiciones del concreto se plantea una pendiente con  $\alpha=5,000$  y con un límite inferior de 4,900.

#### $\varepsilon_{c0}$

Respecto a la deformación al esfuerzo máximo  $\varepsilon_{c0}$ , se obtuvo para los concretos convencionales un valor promedio de  $\varepsilon_{c0} = 0.0019$  similar al 0.002 usado en la literatura, los concretos del grupo de alta resistencia presentaron mayores deformaciones con un promedio de  $\varepsilon_{c0} = 0.0025$ . Mientras que las condiciones especiales evaluadas no presentaron modificaciones importantes en  $\varepsilon_{c0}$ , solo los diseños con menor porcentaje de caras fracturadas redujeron este comportamiento en 0.001 respecto al diseño de control correspondiente a un 5%. Los resultados obtenidos de  $\varepsilon_{c0}$  que se pueden describir con la función de densidad de probabilidad Lognormal con  $\sigma = 0.163$  y  $\mu = -6.261$  con un estadístico = 0.0405

De manera general agregados con superficies rugosas y fracturadas exhibieron mayores deformaciones antes de llegar al esfuerzo máximo, posiblemente a la mejor interacción en la ITZ, los agregados lisos limitan esta interacción entre la pasta reduciendo las deformaciones finales, tomando mayor influencia el agregado en las deformaciones.

#### VPU

Los resultados de VPU, presentan una relación directa con la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del concreto. Con un comportamiento similar para 4 de los 5 agregados evaluados, solo las muestras elaboradas con el agregado de Medellín (C-MED-3), presentan mayores valores de VPU, asociados a los mejores desempeños en resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del concreto, en los que los modelos de regresión no representan de la mejor manera estos resultados, con un comportamiento más asociado a una variable uniforme, donde la variación de la lectura de VPU no es capaz de representar en buena medida las propiedades físico mecánicas del concreto.

En la literatura se presentan modelos de tipo exponencial que relacionan los resultados de VPU con las propiedades físico-mecánicas del concreto, la mayoría de estos modelos se plantean para un espectro amplio de resistencias, en este trabajo se realizó un análisis de residuos evidenciando que para concretos convencionales entre los 21 y 43 MPa el mejor modelo era el lineal.

El diseño con modificación de caras fracturadas (E-BAQ-MC) presentó un incremento de las lecturas de VPU, comportamiento posiblemente asociado a la modificación de la superficie realizada al agregado, ya que la onda de pulso ultrasónico que viaja a través del concreto posee una mayor velocidad, especialmente en la ITZ donde las caras lisas del agregado

restringen la interacción con la matriz de cemento, reduciendo el tiempo necesario para el recorrido de la onda.

El mejor desempeño del ensayo de VPU, se obtiene al diferenciar los tipos de diseños, en alta y convencionales, donde la relación a/c, juega un papel importante al describir los resultados, cuyas ecuaciones se presentan a lo largo de este documento. Los modelos disponibles para la estimación de este parámetro presentan una gran relación para las condiciones locales evaluadas.

## **Resistividad**

La información disponible en la literatura sobre el ensayo de resistividad eléctrica está mayormente asociado a la hidratación del concreto, de manera que, con la evolución de la hidratación del cemento modifica su respuesta.

Con la información disponible se evidencia una relación directa entre la resistividad y las propiedades físico mecánicas del concreto, con una tendencia marcada por la a/c con la que se elaboró cada cilindro. Los mayores valores de resistividad se obtuvieron en los concretos realizados con el agregado de Barranquilla (CEBAQ-7), mientras que los resultados de los concretos elaborados con el agregado de Santamarta se distribuyen en un rango de resistividades menores.

Los diseños elaborados con el 7% de micro sílice presentan mayores resistividades que los demás diseños realizados en el grupo de especiales, evidenciando la modificación en la solución de poros producto con el cambio del cementante, los demás diseños de este grupo se comportan muy similar a lo presentado previamente del agregado de Barranquilla (C-BAQ-7).

La relación a/c evaluada a diferentes edades, no representa una regresión sólida capaz de representar el comportamiento del módulo de elasticidad, mientras que para la resistencia a la compresión sí presenta un patrón, donde, con resultados similares de resistividad se observa que a menores a/c los resultados son mayores.

## **Tracción indirecta**

Se presentaron los resultados de los ensayos realizados a los concretos realizados con cada agregado en sus tres relaciones a/c, para un total de 30 muestras, el análisis de discordancia realizado, arroja que cada uno de ellos tiene un comportamiento único en la relación entre la resistencia a la compresión y la tensión indirecta.

Dados los resultados obtenidos, se resalta influencia que posee el agregado en la tracción indirecta de cada mezcla, de manera que agregados frágiles entregaran valores más bajos, en algunos casos, los planos de falla se dan por la falta de adherencia entre el agregado y la matriz de cemento, de manera que a mayor adherencia se dilata la falla en la ITZ, hasta llegar al punto donde al disminuir la relación a/c, la matriz de cemento adquiere una rigidez que supera a la del agregado y se presentan caídas como el caso de los concretos (C-MED-3) y (C-BOG-1).

Dada la naturaleza del ensayo se exige el agregado al máximo, de manera que los resultados obtenidos están ligados al desprendimiento en la ITZ o a la falla del agregado, donde en la mayoría de los casos los planos de falla se da en la zona de contacto con el agregado, quedando marcado en la cara contraria la forma de la partícula, por otro lado, los resultados más bajos se dan en los cilindros donde falla el agregado (C-SMR-9), que posee una textura rugosa garantizando una buena adherencia de manera que no se observan planos de falla alrededor sino sobre el agregado.

Dada la industrialización de la construcción, se han optimizado los procesos, por tal motivo, es de vital importancia evaluar diferentes alternativas capaces de dar respuesta a las necesidades de la obra. Por lo que en este trabajo se plantean un análisis donde se exponen los costos unitarios de elaborar concreto en cada ciudad con los diferentes agregados disponibles. Dentro de este análisis se evidencia una oportunidad para la fabricación de concreto en Barranquilla con los agregados en Santamarta a un costo muy similar con un incremento de 3 MPa. En cuanto al módulo de elasticidad la mejor alternativa será incrementar la relación a/c, llegando a concreto de alta resistencia.



## Referencias

- AASHTO. (2006). Interim bridge design specifications and commentary. *American Association of Highway and Transportation Officials Washington*.
- ACI 211-1. (1991). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete* (A. 211.1 (ed.)). American Concrete Institute. Committee 211.
- ACI 318. (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete. In *American Concrete Institute*.
- ACI 363. (1997). *State-of-the-Art Report on High-Strength of concrete. 2*.
- Aïtcin, P. C., & Mehta, P. K. (1990). Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials Journal*, 87(2), 103–107.
- Alexander, M., & Mindess, S. (2010). Aggregates in concrete. In *CRC Press* (Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Amézquita, A., Cortes, J., & Sabaleta, J. (1995). Resumen final y conclusiones sobre el ciclo investigativo del módulo de elasticidad del concreto. In *Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana*.
- ARGOS. (2018). *Cementos Argos S.A Presentación corporativa 2018*.
- AS-3600. (2009). Concrete structures, in Australian Standards. *Standards Australia, Australia*.
- ASTM. (2009). E6 - 09 Methods of Mechanical Testing. *Astm E6*, 1–11. <https://doi.org/10.1520/E0006-09B.2>
- ASTM C469. (2014). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *Astm C469/C469M*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0469>
- Attard, M. M., & Setunge, S. (1996). The stress-strain relationship of confined and unconfined normal and high strength concretes. *Materials Journal*, 5, 432–442.
- Azarsa, P., & Gupta, R. (2017). Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8453095>
- Bentz, D. P., Jones, S. Z., Ardani, A., Arnold, J., & Stutzman, P. E. (2017). INFLUENCE OF AGGREGATE PROPERTIES ON CONCRETE. *SES Group and Associates, Federal Highway. Administration Engineering Laboratory National Institute of Sta, January*.
- Beshr, H., Almusallam, A. A., & Maslehuddin, M. (2003). Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 17(2), 97–103. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00097-1)
- Bilir, T. (2016). Investigation of performances of some empirical and composite models for predicting the modulus of elasticity of high strength concretes incorporating ground pumice and silica fume. *Construction and Building Materials*, 127, 850–860.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.054>

- BS-5400-4. (1990). Steel, concrete and composite bridges, Part 4: Code of practice for design of concrete bridges. *Committee Reference CSB/59, Draft for*.
- Caliskan, S., & Karihaloo, B. L. (2004). Effect of surface roughness, type and size of model aggregates on the bond strength of aggregate/mortar interface. *Interface Science*, 12(4), 361–374. <https://doi.org/10.1023/B:INTS.00000042334.43266.62>
- Carol, I., & Lã, C. M. (2001). *Micromechanical analysis of quasi-brittle materials using fracture-based interface elements*. 215, 193–215. <https://doi.org/10.1002/nme.277>
- CEB-FIP. (2003). CEB-FIP model code 1990. In *Beton C E I d* (Thomas Tel).
- Cortés, J., Zabaleta, J., & Amézquita, A. (1995). Resumen final y conclusiones sobre el ciclo investigativo del módulo de elasticidad del concreto. In *Trabajo de grado pregrado*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- CSA-A23. (2004). *Design of concrete structures*. Canadian Standards Association.
- Del Río, L. M., Jiménez, A., López, F., Rosa, F. J., Rufo, M. M., & Paniagua, J. M. (2004). Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing. *Ultrasonics*, 42(1–9), 527–530. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.01.053>
- Domingo, J., Carriera, & Chu, K.-H. (1985). Stress-strain relationship for plain concrete in compression. *ACI JOURNAL*, 82–72(8), 797–804. <https://doi.org/10.1007/BF02473452>
- EHE. (1998). *Spanish code for structural concrete* (R. D. 2661 (ed.)).
- EN-1008. (2007). *Mixing water for concrete - Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete*. UNE.
- EN 1992-1-1. (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*.
- Faccaoru, I. (1970). Non-destructive testing of concrete in Romania. *Symposium on NDT of Concrete and Timber, London: In*, 39.
- Farias Moreno, S. (1992). *APROXIMACION A LA OBTENCION DEL MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- FHWA. (2000a). Material Property Characterization of Ultra- High Performance Concrete. *Highway Research Center: McLean*.
- FHWA. (2000b). Material Property Characterization of Ultra- High Performance Concrete. *Highway Research Center: McLean, Administration F H*.
- Fic, S., Lyubomirskiy, N. V., & Barnat-Hunek, D. (2018). The influence of the natural aggregate roughness on the ITZ adhesion in concrete. *Materials Science Forum*, 931 MSF, 564–567. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.564>
- Fuller, W. B., & Thompson, S. E. (1907). *The laws of proportioning concrete*.

- Güçlüer, K. (2020). Investigation of the effects of aggregate textural properties on compressive strength (CS) and ultrasonic pulse velocity (UPV) of concrete. *Journal of Building Engineering*, 27(April 2019), 100949. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100949>
- Hognestad, E., & Wanson, N. W. (1955). Concrete stress distribution in Ultimate Strength Design. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hong, L., Gu, X., & Lin, F. (2014). Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete. *Construction and Building Materials*, 65, 338–349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.131>
- Jan G.M. van Mier. (1997). *Fracture Processes of Concrete* (CRC Press (ed.); 1st Editio). CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b22384>
- Jansen, D., & Shah, S. (1996). Effect of Length on Compressive Strain Softening of Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 230–238(123), 1–23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123)
- JSCE. (2010). *Guidelines for concrete, Standard specifications for concrete structures- Design* (J. S. of C. Engineering (ed.)).
- Kahraman, S., & Fener, M. (2007). Predicting the Los Angeles abrasion loss of rock aggregates from the uniaxial compressive strength. *Materials Letters*, 61(26), 4861–4865. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.06.003>
- Kaplan, M. F. (1959). The effects of age and water/cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 11(32), 85–92. <https://doi.org/10.1680/mac.1959.11.32.85>
- Kazi, A., & Al-Mansour, Z. R. (1980). Influence of geological factors on abrasion and soundness characteristics of aggregates. *Engineering Geology*, 15(3–4), 195–203. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(80\)90034-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(80)90034-4)
- Laplante, B. P. (1991). *Abrasion resistance of concrete*. 3(1), 19–28.
- Lee, T., & Lee, J. (2020). Setting time and compressive strength prediction model of concrete by nondestructive ultrasonic pulse velocity testing at early age. *Construction and Building Materials*, 252, 119027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119027>
- Lorecife, R., & Patron, M. R. (2005). Modelación de procesos de falla en hormigón mediante criterios meso y macromecánicos. In *Modelización Aplicada a la ingeniería* (p. 465). Universidad Tecnológica Nacional.
- Malhotra, V. M. (1976). *Testing hardened concrete: nondestructive methods*.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete Microstructure, Properties, and Materials* (McGraw-Hill (ed.)). <https://doi.org/10.1036/0071462899>
- Moehle, J. (2014). *Seismic design of reinforced concrete buildings*. McGraw Hill Professional.
- Mohammed, T. U., & Mahmood, A. H. (2016). Effects of maximum aggregate size on UPV of brick aggregate concrete. *Ultrasonics*, 69(April), 129–136.

<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.04.006>

- Mohammed, T. U., & Rahman, M. N. (2016). Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 832–841. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.102>
- NBR-6118. (2003). *Brazilian association of technical standards*.
- Noguchi, T, & Nemati, K. M. (1990). *Relationship between compressive strength and modulus of elasticity of High-Strength Concrete*. 1–6.
- Noguchi, Takafumi, Tomosawa, F., Nemati, K. M., Chiaia, B. M., & Fantilli, A. R. (2009). A practical equation for elastic modulus of concrete. *ACI Structural Journal*, 106(5), 690–696. <https://doi.org/10.14359/51663109>
- NSR-10. (2010). *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE*.
- NSR-98. (1998). *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCION SISMO RESITENTE*.
- NTC-118. (2019). *Cementos. Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante aguja de vicat* (I. C. de N. T. y C. ICONTEC (ed.); Séptima).
- NTC 33. (2019). *Cementos. Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire* (I. C. de N. T. y C. ICONTEC (ed.); Cuarta).
- NTC1032. (2013). *INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. MÉTODO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE EN EL CONCRETO FRESCO. MÉTODO DE PRESIÓN*. 18.
- NTC121. (2014). *ESPECIFICACIÓN DE DESEMPEÑO PARA CEMENTO HIDRÁULICO*. In *ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas2: Vol. TERCERA*.
- NTC129. (2019). *PRÁCTICA PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE AGREGADOS*. 18.
- NTC1377. (2010). *INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO PARA ENSAYOS EN EL LABORATORIO*.
- NTC174, I. (2018). *Especificaciones de los agregados para concreto*. NTC 174. *Norma Técnica Colombiana, Sexta actu*.
- NTC220. (2017). *CEMENTOS. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO A LA COMPRESIÓN, USANDO CUBOS DE 50 MM O 2 PULGADAS DE LADO* (I. C. de N. T. y C. ICONTEC (ed.); SEXTA).
- NTC3459. (2001). *CONCRETOS. AGUA PARA LA ELABORACION DE CONCRETO* (I. C. de N. T. y C. ICONTEC (ed.)).
- NTC3773. (1995). *INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA. GUIA PARA LA INSPECCION PETROGRAFICA DE AGREGADOS PARA CONCRETO*. *ICONTEC -*

*Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Primera, 16.*

NTC396. (2018). CONCRETOS. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DEL CONCRETO. *Norma Técnica Colombiana*, 11.

NTC4325. (1997). INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. MÉTODO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL PULSO ULTRASÓNICO A TRAVÉS DEL CONCRETO. *ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas*, 1, 33.

NTC454. (2011). INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. CONCRETO FRESCO. TOMA DE MUESTRAS. *ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas*, 5.

NTC490. (1971). *Yeso Para Refrentado De Cilindros De Hormigón. Ensayo De Compresión.*

NTC504. (1995). *INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA. REFRENTADO DE ESPECIMENES CILINDRICOS DE CONCRETO.*

NTC550. (2018). Elaboración y curado de especímenes de concreto en el sitio de trabajo. *ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas*, 3, 33.

NTC673. (2010). CONCRETOS. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECIMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO. *ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas*, 571, 13.

NTC722. (2000). CONCRETO. METODO DE ENSAYO PAR DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA TENSION INDIRECTA DE ESPECIMENES CILINDRICOS DE CONCRETO. *ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas*, Tercera, 13.

Piasta, W., Góra, J., & Budzyński, W. (2017). Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and of ordinary and high performance concretes. *Construction and Building Materials*, 153, 728–739. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.167>

Poole, A., & Sims, I. (2003). *Advanced Concrete Technology-Constituent Materials* (J. Newman & B. Seng-Choo (eds.); Elsevier L). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Poole, A. B., & Sims, I. (Eds. . (2016). *CONCRETE PETROGRAPHY*. CRC Press.

Quimbay, R. H. (2014). *Estimación del modulo de elasticidad del concreto y del mortero mediante TCTM.*

Quimbay Herrera, R. (2016). *Estimacion del modulo de elasticidad del concreto y del mortero mediante TCTM*. Universidad nacional de Colombia.

Quintero Ortiz, L., Cruz Hernández, R., & Peña Santos, D. (2014). Effect of the Water Content on the Strength and the Ultrasonic Pulse Velocity of Concrete. *Revista Tecnura*, 18(42), 103–113.

Ramezaniapour, A. A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., & Moodi, F. (2011). Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2472–2479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069>

- Ramírez, M. C. H. (2011). *Efecto de las características de los componentes del concreto en el Módulo de Elasticidad para el caso colombiano*. Universidad de los Andes.
- Ruiz, D., Borrero, M. C., León, M., & Vacca, H. (2013a). Estimación de la incertidumbre aleatoria de la distorsión sísmica de entrepiso de pórticos de concreto reforzado considerando la variabilidad del módulo elástico del concreto de Bogotá. *Revista Ingeniería de Construcción*, 28(1), 95-106.
- Ruiz, D., Borrero, M. C., León, M., & Vacca, H. (2013b). Estimación de la incertidumbre aleatoria de la distorsión sísmica de entrepiso de pórticos de concreto reforzado considerando la variabilidad del módulo elástico del concreto de Bogotá. *Revista Ingeniería de Construcción*, 28(1), 95–106. <https://doi.org/10.4067/SO718-50732013000100006>
- Santiago, S. D., & Hilsdorf, H. K. (1973). Fracture mechanisms of concrete under compressive loads. *Cement and Concrete Research*, 3(4), 363–388. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(73\)90076-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90076-8)
- Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, 12(4), 411–421. <https://doi.org/10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c>
- Sengul, O. (2014). Use of electrical resistivity as an indicator for durability. *Construction and Building Materials*, 73, 434–441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077>
- Sengul, O., & Gjörv, O. E. (2008). Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction. *ACI Materials Journal*, 105(6), 541–547. <https://doi.org/10.14359/20195>
- Shih, T. S., Lee, G. C., & Chang, K. C. (1989). On static modulus of elasticity of normal - weight concrete. *J Struct Eng*, 115(10), 2579–2587.
- Solís Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2008). Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1225–1231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.014>
- Su, R. K. L., & Bei, C. (2008). The Effect of Coarse Aggregate Size on the Stress-strain Curves of Concrete under Uniaxial Compression. *HKIE Transactions Hong Kong Institution of Engineers*, 15(3), 33–39. <https://doi.org/10.1080/1023697X.2008.10668122>
- Tasdemiry, C. S., Barr, B. I. G., Jefferson, A. D., & Lydon, F. D. (1998). *Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete : A Three-Phase Composite Model Approach*. 20, 301–318.
- TS-500. (2000). Building code requirements for reinforced concrete. In *Turkish Standards Institute*.
- Ugur, I., Demirdag, S., & Yavuz, H. (2010). Effect of rock properties on the Los Angeles abrasion and impact test characteristics of the aggregates. *Materials Characterization*, 61(1), 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.10.014>
- Vakhshouri, B., & Nejadi, S. (2019). Empirical models and design codes in prediction of modulus of elasticity of concrete. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(1),

38–48. <https://doi.org/10.1007/s11709-018-0479-1>

- van Mier, J., Shah, S. P., Arnaud, M., Balayssac, J., Bascoul, A., Choi, S., Dasenbrock, D., Ferrara, G., French, C., Gobbi, M., Karihaloo, B., König, G., Labuz, J., Lange-Kornbak, D., Markeset, G., Pavlovic, M., Simsch, G., Thienel, K., Turatsinze, A., ... Zissopoulos, D. (1997). RILEM TC 148-SSC: TEST METHODS FOR THE STRAIN-SOFTENING RESPONSE OF CONCRETE Strain-softening of concrete in uniaxial compression. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 30(30), 195–209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02486177>
- Vilardell, J., Aguado, A., Agullo, L., & R Gettu. (1998). ESTIMATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY FOR DAM CONCRETE. *Cement and Concrete Research*, 43(March), 1–9. <https://doi.org/.1037//0033-2909.126.1.78>
- Vonk, R. A. (n.d.). Softening of concrete loaded in compression. *Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven*. <https://doi.org/https://doi.org/10.6100/IR375705>
- Wu, K. R., Chen, B., Yao, W., & Zhang, D. (2001). Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1421–1425. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00588-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00588-9)
- Yildirim, H., & Sengul, O. (2011). Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1645–1652. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.009>